

TESIS

**ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PROSES PENGOLAHAN
REFRACTORY BRICK CONVERTER DI PT VALE INDONESIA TBK
DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)**

*Environmental Impact Analysis of Refractory Brick Converter Processing in PT
Vale Indonesia Tbk with Life Cycle Assessment (LCA) Method*

**FAUZIAH NUR AISYAH
D092211006**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



PENGAJUAN TESIS

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PROSES PENGOLAHAN REFRACTORY BRICK CONVERTER DI PT VALE INDONESIA TBK DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA)

Tesis

Sebagai Salah Satu syarat Mencapai Gelar Magister Teknik
Program Studi Teknik Lingkungan

Disusun dan diajukan oleh

**FAUZIAH NUR AISYAH
D092211006**

Kepada



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



TESIS

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PROSES PENGOLAHAN *REFRACTORY BRICK CONVERTER* DI PT VALE INDONESIA TBK DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)*

FAUZIAH NUR AISYAH
D092211006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 27 Februari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Ir. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T.
NIP. 197211192000121001

Pembimbing Pendamping



Dr. Eng. Ir. Ibrahim Djamaluddin, S.T., M.Eng.
NIP. 197512142015041001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng.
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Lingkungan



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP. 197506232015042001



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fauziah Nur Aisyah
Nomor Mahasiswa : D092211006
Program Studi : Teknik Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul **“ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PROSES PENGOLAHAN REFRACTORY BRICK CONVERTER DI PT VALE INDONESIA TBK DENGAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr.Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T. sebagai Pembimbing Utama dan Dr.Eng. Ibrahim Djamaluddin, S.T., M.Eng. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya ilmiah yang diterbitkan maupun yang tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan di dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diterima untuk publikasi pada Jurnal Internasional *“Revista De Gestao Social e Ambiental”* terindeks Scopus dan SJR Q4 dengan judul **“LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF REFRACTORY BRICK WASTE MANAGEMENT IN NICKEL MATTE PROCESSING USING SIMAPRO”**.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Februari 2024

Yang menyatakan,



Fauziah Nur Aisyah
Fauziah Nur Aisyah

KATA PENGANTAR

Segala Puji kehadiran Allah SWT atas Rahmat, Nikmat dan berkah yang diberikan serta salam dan Shalawat kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Analisis Dampak Lingkungan Proses Pengolahan *Refractory Brick Converter* di PT Vale Indonesia Tbk Dengan Metode *Life Cycle Assessment (LCA)*”**”.

Dalam penyelesaian tesis ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dorongan positif dari berbagai pihak. Dengan ketulusan hati, penulis ingin mengucapkan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT.
2. Kedua orangtua yang sangat saya hormati Bapak M. David Lecku MPUE dan Ibu Faridah Kholik yang telah mendukung dan memberikan motivasi serta DOA yang begitu luar biasa dan selalu mendampingi penulis hingga sampai ke tahap ini. Untuk adik dan kakak penulis dan seluruh keluarga yang selalu memberikan semangat dan menjadi *support system* selama ini.
3. Ibu Dr. Roslinda Ibrahim, SP., MT selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Lingkungan yang telah memberikan arahan, kritik dan saran sejak awal seminar proposal. Dan juga selalu memberikan informasi update terkait *conferences* dan info akademik lainnya.
4. Bapak Dr. Eng.Ir.Irwan Ridwan Rahim,S.T.,M.T selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah bersedia membimbing dan meluangkan waktunya dari awal sampai akhir serta selalu meberikan saran, masukan dan arahan kepada penulis dalam penyusunan dan perbaikan tesis serta memberikan *sharing knowledge* terkait analisa dampak lingkungan.
5. Bapak Dr. Eng. Ibrahim Djamaluddin, S.T., M.Eng selaku Dosen Pembimbing II yang telah menyediakan waktunya selama proses bimbingan serta saran dan selalu memberikan *insight* baru selama asistensi baik secara offline maupun online dan *sharing knowledge* terkait budaya pendidikan di Jepang.

Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan pengalaman bermanfaat yang



telah diberikan selama proses perkuliahan yang belum pernah saya peroleh sebelumnya.

7. Seluruh staf Departemen Teknik Lingkungan yang sudah banyak membantu penulis dalam melengkapi semua proses administrasi. Kepada Kak Olan dan Ibu Sumiati yang selalu sigap dalam merespon penulis terkait tahapan administrasi untuk penyelesaian thesis dan memberikan informasi yang berkaitan dengan info akademik.
8. Manajemen PT Vale Indonesia Tbk yang telah memberikan penulis kesempatan untuk melakukan penelitian serta segenap karyawan PT Vale yang telah memberikan dukungan berupa informasi dan pengalaman sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan lancar.
9. Rekan seperjuangan Mahasiswa Magister Teknik Lingkungan angkatan 2020, serta semua pihak yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuan yang tak sempat penulis sebutkan satu persatu.
10. Rekan-rekan *environment engineer* PT Vale Indonesia (Anwar Rosyid, Bima Sakti dan Laudza) yang telah banyak membantu dalam penyediaan data dan mengarahkan dalam proses pengolahan data menggunakan *software*. *Senior Manager Environment & Reclamation Dept* Bapak Umar Kasmon atas kesediaannya dalam mengkonfirmasi kebutuhan data yang akan dilampirkan penulis dalam thesis ini.
11. Kepada Bapak Irwan Zulfikar selaku Senior Manager Converter Operation dan sekaligus sebagai atasan saya di PT Vale Indonesia yang telah memberikan motivasi, kesempatan untuk bisa melaksanakan penelitian di section Converter dan juga support yang tiada henti dalam proses untuk persiapan cuti untuk kebutuhan studi saya.
12. Rekan-rekan Converter Operation, Team Welani Jaya Soroako, Department PP-EPF, Department Process Technology, Department CMD, Department Energy, Section Mason Refraktori dan masih banyak lagi yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu yang sudah banyak membantu dalam menyediakan data penelitian untuk penyelesaian tesis ini.

Seluruh pihak manajemen PT Vale Indonesia Tbk di Soroako yang telah memberikan dukungan serta peluang dan kesempatan untuk melaksanakan



penelitian di Perusahaan tempat saya bekerja saat ini.

14. Kepada Mas Budi Purwoko, Bapak Ayub Malaha, Dian Try Saputri, Wihman Sakti, Bapak Yemerson dan rekan kerja di section Converter yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu yang telah memberikan support yang tulus kepada penulis.
15. Kepada rekan-rekan SCM departemen yang telah banyak membantu dalam ketersediaan data terkait timbulan limbah refraktori brick converter dan juga data pendukung lainnya.
16. Kepada keluarga besar saya yang selalu hadir dan memberikan semangat serta dukungan dalam penyelesaian tesis ini.

Akhir kata, dengan mengucapkan rasa syukur Alhamdulillah dan dengan segala keterbatasan yang dimiliki penulis sehingga dalam menyelesaikan tesis ini tidak terlepas dari kesalahan dan kekurangan. Penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun guna melengkapi kekurangan tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat untuk banyak orang dan meningkatkan kemajuan teknologi di masa depan.

Sorowako, 27 Januari 2024

Fauziah Nur Aisyah

D092211006



ABSTRAK

FAUZIAH NUR AISYAH. *Analisis Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Refractory Brick Converter di PT Vale Indonesia Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA)* (dibimbing oleh **Irwan Ridwan Rahim; Ibrahim Djamaluddin**).

Refraktori brick merupakan salah satu material yang sangat dibutuhkan dalam proses peleburan pada temperatur tinggi. Refraktori brick bekas akan terus menerus dihasilkan setelah habis masa pakainya. Hal ini menjadi tantangan bagi suatu industri untuk melakukan pengolahan agar tidak menimbulkan dampak bagi lingkungan di masa yang akan datang. Perusahaan menyadari akan pentingnya melakukan pengolahan refraktori brick bekas yang saat ini dikirim ke pihak ketiga serta masih minimnya upaya pemanfaatan menggunakan pendekatan konsep 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*). Sebagai upaya untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh kehadiran material ini sehingga dianggap perlu untuk melakukan penilaian dampak lingkungan terkait pengolahan refraktori brick sehingga upaya pemanfaatan yang dilakukan tepat sasaran dan tidak berdampak buruk terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

Studi ini menentukan potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari dua skenario menggunakan *software* SimaPro berdasarkan metode *life cycle assessment* (LCA) dengan batasan sistem *gate to gate*. Penilaian dampak yang dihasilkan menggunakan metode CML-IA dengan empat kategori dampak dan *Cumulative Energy Demand* (CED). Terdapat dua skenario yaitu, skenario 1 adalah proses eksisting pengolahan refraktori brick bekas dikirim ke pihak ketiga dan skenario 2 adalah alternatif perbaikan penggunaan kembali refraktori brick sisa potongan pada ladle penampung converter matte. Perhitungan emisi CO₂ dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil pada alat transportasi selama proses pengangkutan refraktori brick bekas ke pihak ketiga. Emisi gas rumah kaca yang berkontribusi adalah CO₂, NO_x, dan CH₄. Dampak lingkungan yang dihasilkan dalam *software* dinyatakan dalam satuan CO₂ eq. Hasil penilaian dampak berdasarkan karaktersisasi pada skenario 1 menunjukkan per 1 kg refraktori brick menyebabkan dampak *global warming potential* (GWP) (6,8637 kg CO₂ eq), *abiotic depletion (fossil fuels)* (92,0818 MJ), *photochemical oxidation* (5,52E-06 kg C₂H₄ eq), *eutrophication* (1,49E-05 kg PO₄---eq) dan dampak pemakaian energi *non-renewable* (97,6067 MJ), dan pemakaian energi *renewable* (0,0169 MJ). Sedangkan pada skenario 2 dihasilkan dampak *global warming potential* (6,2303 kg CO₂ eq), *abiotic depletion (fossil fuels)* (83,5849 MJ), *photochemical oxidation* (5,02E-06 kg C₂H₄ eq), *eutrophication* (1,35E-05 kg PO₄---eq) dan dampak pemakaian energi *non-renewable* (88,6000 MJ), dan pemakaian energi *renewable* (0,0207 MJ). Penilaian dampak lingkungan yang dilakukan dapat memberikan gambaran kepada perusahaan terkait dampak yang ditimbulkan dari hasil pengolahan refraktori brick converter. Penggunaan kembali refraktori brick sisa potongan pada ladle ng converter matte memberikan kontribusi positif dapat mengurangi erhadap lingkungan.



nci: Refraktori brick, *Life Cycle Assessment*, SimaPro

ABSTRACT

FAUZIAH NUR AISYAH. *Environmental Impact Analysis of Refractory Brick Converter Processing in PT Vale Indonesia Tbk with Life Cycle Assessment (LCA) Method* (supervised by **Irwan Ridwan Rahim; Ibrahim Djamaluddin**).

Refractory brick is one of the materials needed in the smelting process at high temperatures. Used brick refractories will continue to be produced after the end of their useful life. This becomes a challenge for an industry to do processing so as not caused an impact on the environment in the future. The company realises the importance of processing used brick refractories that are currently sent to third parties as well as the lack of utilisation efforts using 3R concept approach (Reduce, Reuse, Recycle). As an effort to reduce the environmental impact caused by the presence of this material, it is deemed necessary to conduct an environmental impact assessment related to the processing of refractory bricks so that the utilisation efforts made are right on target and do not adversely affect the environment if not manage properly.

This study determines the potential environmental impacts resulting from two scenarios using SimaPro software base on the life cycle assessment (LCA) method with boundary system is gate to gate. The resulting impact assessment uses the CML-IA method with four impact categories and Cumulative Energy Demand (CED). There are two scenarios, namely, scenario 1 is the existing process of processing used refractory bricks sent to third parties and scenario 2 s an alternative improvement in the reuse of the remaining refractory brick pieces in the ladle of converter matte container. The calculation CO₂ emissions results from the use of fossil fuels in transporation equipment during the process of transporting used refractory bricks to third parties. The contributing greenhouse gas emissions are CO₂, NO_x, and CH₄. The environmental impact generated in the software is expressed in units of CO₂ eq.

The results of the impact assessment based on characterization in scenario 1 showed that per 1 kg of refractory brick causes the impact of global warming potential (GWP) (6,8637 kg CO₂ eq), abiotic depletion (fossil fuels) (92,0818 MJ), photochemical oxidation (5,52E-06 kg C₂H₄ eq), eutrophication (1,49E-05 kg PO₄---eq) and the impact of non-renewable energy consumption (97,6067 MJ), and renewable energy use (0,0169 MJ). Meanwhile, scenario 2 resulted in the impact of global warming potential (GWP) (6,2303 kg CO₂ eq), abiotic depletion (fossil fuels) (83,5849 MJ), photochemical oxidation (5,02E-06 kg C₂H₄ eq), eutrophication (1,35E-05 kg PO₄---eq) and the impact of non-renewable energy consumption (88,6000 MJ), and renewable energy consumption (0,0207 MJ). The environmental impact assessment carried out can provide an overview to the company regarding the impact arising from the processing of brick converter refractories. The reuse of the remaining refractory brick pieces in the matte converter ladle makes a positive contribution to reducing the impact on the environment.



Is: Refractory brick, Life Cycle Assessment, SimaPro

DAFTAR ISI

<u>Keterangan/Penomoran</u>	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xix
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	9
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan	9
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan	9
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan	10
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Refraktori	12
2.1.1 Penyiapan refraktori dalam industri metalurgi	17
2.1.2 Mengapa dan bagaimana mendaur ulang refraktori?	18
2.1.3 Proyek terbaru tentang pengelolaan limbah refraktori	20
2.1.4 Tinjauan literatur tentang daur ulang refraktori	23
2.1.5 Kepentingan dan perhatian perusahaan terhadap daur ulang	24
2.1.6 Mendaur ulang refraktori yang mengandung krom bekas	27
2.1.7 Aplikasi daur ulang refraktori	29
2.1.8 Tinjauan tentang daur ulang refraktori untuk industri besi dan baja	36



2.2	<i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	38
2.2.1	Langkah-langkah <i>life cycle assessment (LCA)</i>	38
2.2.2	Metode penilaian dampak daur hidup	40
2.2.3	Metode CML-IA	41
2.2.4	Metode <i>cumulative energy demand (CED)</i>	42
2.2.5	Metode IMPACT World+	43
2.2.6	Kategori dampak	44
2.3	Pemilihan software untuk analisa LCA	46
2.3.1	Penggunaan software SimaPro 8.3	47
2.4	Pengolahan Limbah dengan 3R (Reduce, Reuse, Recycle).....	52
2.5	Penelitian Terkait	54
2.6	Kerangka penelitian analisis dampak lingkungan proses pengolahan refraktori brick converter di PT Vale Indonesia Tbk.....	59
BAB III. METODE PENELITIAN/PERANCANGAN		60
3.1	Rancangan Penelitian	60
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	60
3.3	Diagram alir penelitian	61
3.4	Alat dan Kebutuhan Data	62
3.5	Penentuan Batasan Kajian LCA	63
3.6	Teknik Pengumpulan Data	65
3.7	Tahap Pengolahan Data	72
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		78
4.1	Perhitungan Data	78
4.1.1	Ringkasan Data LCI.....	89
4.2	<i>Life Cycle Impact Assessment (LCIA)</i>	100
4.2.1	Karakterisasi Analisis.....	100
4.2.2	Normalisasi Analisis	101
4.3	Interpretasi Data	117
4.3.1	<i>Global Warming Potential (GWP)</i>	117
4.3.2	Potensi Pembentukan Oksidan Fotokimia (<i>Photochemical Oxidation</i>).....	118
4.3.3	Potensi Eutrofikasi	119



4.3.4 Potensi Penurunan Abiotik (<i>Abiotic Depletion Fossil</i>).....	120
4.3.5 Penggunaan Energi.....	120
4.3.6 Analisis <i>Hotspot</i>	121
4.3.7 Rekomendasi Program Perbaikan 3R.....	128
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	132
5.1 Kesimpulan.....	132
5.2 Saran	133
DAFTAR PUSTAKA	134
LAMPIRAN	139



DAFTAR TABEL

<u>Keterangan/Penomoran</u>	<u>Halaman</u>
Tabel 1. Data timbulan limbah refraktori brick <i>partial reline</i> converter tahun 2022	5
Tabel 2. Jenis-jenis refraktori	16
Tabel 3. Komposisi kimia rata-rata refraktori baru dan bekas	31
Table 4. Sifat fisikomekanis refraktori yang dihasilkan dengan agregat daur ulang	32
Tabel 5. Kategori dampak metode CML-IA	42
Tabel 6. Kategori dampak metode <i>cumulative energy demand</i>	43
Tabel 7. <i>Software</i> analisa LCA.....	46
Tabel 8. Penelitian Terdahulu.....	54
Tabel 9. Kebutuhan data <i>life cycle assessment</i>	62
Tabel 10. Kategori Dampak metode CML-IA <i>baseline</i>	74
Tabel 11. Kategori dampak metode CED	74
Tabel 12. Ringkasan data LCI skenario 1 proses eksisting tahun 2023	89
Tabel 13. Ringkasan data LCI skenario 2 alternatif perbaikan tahun 2023	90
Tabel 14. Ringkasan data LCI per unit fungsi skenario 1 proses eksisting tahun 2023	91
Tabel 15. Ringkasan data LCI per unit fungsi skenario 2 alternatif perbaikan tahun 2023	92
Tabel 16. Ringkasan perbandingan data LCI per skenario tahun 2023.....	94
Tabel 17. Ringkasan perbandingan data LCI per unit fungsi skenario tahun 2023	95
Tabel 18. Komparasi hasil penilaian dampak skenario 1 dan skenario 2 berdasarkan <i>characterization</i>	100
Tabel 19. Komparasi hasil penilaian dampak skenario 1 dan skenario 2 berdasarkan <i>normalization</i>	101
. <i>Normalization factor</i>	102
. Komparasi hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) skenario 1 dan skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>characterization</i> .	102



Tabel 22. Komparasi hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) skenario 1 dan skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>weighting</i>	103
Tabel 23. Hasil penilaian dampak per unit proses skenario 1 tahun 2023 berdasarkan <i>characterization</i>	105
Tabel 24. Hasil penilaian dampak per unit proses skenario 1 tahun 2023 berdasarkan <i>normalization</i>	106
Tabel 25. Hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 1 tahun 2023 berdasarkan <i>characterization</i>	107
Tabel 26. Hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 1 tahun 2023 berdasarkan <i>weighting</i>	108
Tabel 27. Hasil penilaian dampak per unit proses skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>characterization</i>	110
Tabel 28. Hasil penilaian dampak per unit proses skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>normalization</i>	111
Tabel 29. Hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>characterization</i>	113
Tabel 30. Hasil penilaian dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 2 tahun 2023 berdasarkan <i>weighting</i>	115
Tabel 31. Hotspot proses pengolahan refraktori brick converter skenario 1 berdasarkan normalisasi	122
Tabel 32. Hotspot proses pengolahan refraktori brick converter skenario 2 berdasarkan normalisasi	123
Tabel 33. Perbandingan life cycle assessment dampak global warming untuk <i>case study</i> berdasarkan nilai <i>normalization</i>	125
Tabel 34. Baku mutu karakteristik beracun melalui TCLP untuk penetapan standar pengolahan limbah bahan berbahaya dan beracun sebelum ditempatkan di fasilitas penimbunan akhir	128



DAFTAR GAMBAR

<u>Keterangan/Penomoran</u>	<u>Halaman</u>
Gambar 1. Tungku induksi	16
Gambar 2. Operasi metalurgi & konsep pelapisan	17
Gambar 3. Konfigurasi lapisan sendok baja	18
Gambar 4. Skenario sebelum dan sesudah pemilahan limbah refraktori	19
Gambar 5. Daur ulang refraktori dalam tahapan yang disederhanakan	19
Gambar 6. Strategi daur ulang refraktori proyek REFRASORT.....	20
Gambar 7. Paradigma “5R” yang digunakan oleh Sidenor untuk proyek 5RefAct	21
Gambar 8. Diagram alir proses pembuatan refraktori hingga daur ulang di RHI Magnesita	22
Gambar 9. Diagram alir yang disederhanakan dari langkah-langkah utama daur ulang refraktori	24
Gambar 10. Masalah umum dalam mendaur ulang refraktori bekas.....	25
Gambar 11. Diagram alir untuk mendaur ulang refraktori magnesium-krom bekas dari tungku pembuatan baja.....	28
Gambar 12. <i>Refractory recycling flowsheet</i>	35
Gambar 13. Tata letak peralatan untuk daur ulang baja dan terak di EAF di Ferreire Nord.....	37
Gambar 14. Penilaian dampak <i>midpoint vs endpoint</i>	43
Gambar 15. Tampilan <i>menu description</i>	48
Gambar 16. Tampilan <i>menu libraries</i>	48
Gambar 17. Tampilan <i>menu process</i>	49
Gambar 18. Tampilan <i>menu product stage</i>	49
Gambar 19. Tampilan <i>menu system description</i>	49
Gambar 20. Tampilan <i>menu waste types</i>	50
21. Tampilan <i>menu methods</i>	50
22. Tampilan grafik <i>characterization</i>	51
23. Tampilan grafik <i>normalization</i>	51



Gambar 24. Tampilan grafik <i>weighting</i>	51
Gambar 25. Tampilan grafik <i>single score</i>	51
Gambar 26. Kerangka pemikiran penelitian analisis dampak lingkungan proses pengolahan refraktori brick converter di PT Vale Indonesia Tbk ...	59
Gambar 27. Lokasi penelitian di PT Vale Indonesia Tbk	64
Gambar 28. Diagram alir penelitian	61
Gambar 29. Batasan sistem kajian pengolahan refraktori brick.....	64
Gambar 30. Skenario 1-Kondisi eksisting pengolahan refraktori brick converter	67
Gambar 31. Skenario 2-Alternatif perbaikan (penggunaan kembali refraktori brick bekas sisa potongan pada <i>ladle</i> penampung converter matte)	68
Gambar 32. Faktor <i>characterization non renewable, fossil</i> di SimaPro	75
Gambar 33. Faktor <i>characterization renewable, water</i> di SimaPro.....	76
Gambar 34. Faktor <i>weighting cumulative energy demand</i> di SimaPro	77
Gambar 35. <i>Material Balance</i>	78
Gambar 36. Refraktori brick.....	79
Gambar 37. Refraktori brick bekas <i>chipping</i>	79
Gambar 38. Refraktori <i>brick</i> terlarut dalam terak	80
Gambar 39. Refraktori brick sisa potongan.....	80
Gambar 40. Proses <i>chipping</i> brick converter yang telah habis masa pakainya menggunakan <i>jack hammer</i>	81
Gambar 41. <i>Portable conveyor</i>	81
Gambar 42. Vaccum debu	82
Gambar 43. Brick saw atau alat pemotong batu	82
Gambar 44. Hoist.....	83
Gambar 45. Proses pemasangan castable pada mulut converter	84
Gambar 46. Truk pengangkutan limbah refraktori brick menuju ke TPS	84
Gambar 47. Alat angkut magni.....	87
Gambar 48. Mesin <i>vibrator</i>	88
49. <i>Hoist</i>	88



Gambar 50. Komparasi dampak CML-IA baseline berdasarkan <i>characterization</i>	100
Gambar 51. Komparasi dampak CML-IA baseline berdasarkan <i>normalization</i>	102
Gambar 52. Komparasi dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) berdasarkan <i>characterization</i>	103
Gambar 53. Komparasi dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) berdasarkan <i>weighting</i>	104
Gambar 54. Kontributor dampak per unit proses CML-IA <i>baseline</i> skenario 1 berdasarkan <i>characterization</i>	105
Gambar 55. Kontributor dampak per unit proses CML-IA <i>baseline</i> skenario 1 berdasarkan <i>normalization</i>	107
Gambar 56. Kontributor dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 1 berdasarkan <i>characterization</i>	108
Gambar 57. Kontributor dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 1 berdasarkan <i>weighting</i>	109
Gambar 58. Kontributor dampak per unit proses CML-IA <i>baseline</i> skenario 2 berdasarkan <i>characterization</i>	111
Gambar 59. Kontributor dampak per unit proses CML-IA <i>baseline</i> skenario 2 berdasarkan <i>normalization</i>	113
Gambar 60. Kontributor dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 2 berdasarkan <i>characterization</i>	114
Gambar 61. Kontributor dampak <i>cumulative energy demand</i> (CED) per unit proses skenario 2 berdasarkan <i>weighting</i>	116
Gambar 62. Hasil pengujian sample refraktori bekas PT Vale Indonesia oleh Sucofindo	127
Gambar 63. <i>Refractory Brick Aggregate</i> (RBA) kasar.....	130
Gambar 64. <i>Refractory Brick Aggregate</i> (RBA) halus	130



DAFTAR LAMPIRAN

<u>Keterangan/Penomoran</u>	<u>Halaman</u>
Lampiran 1. Tahapan running data di SimaPro.....	139
Lampiran 2. Tahapan penggunaan kembali brick bekas sisa potongan pada ladle penampung converter matte	149
Lampiran 3. Izin penelitian	150



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan Simbol Arti Keterangan

Cr	: Kromium
CML	: Center of Environmental Science of Leiden University
GRK	: Gas Rumah Kaca
TPA	: Tempat Pembuangan Akhir
B3	: Bahan Berbahaya dan Beracun
TPS	: Tempat Pembuangan Sementara
Kg	: Kilogram
OSHA	: Occupational Safety and Health Administration
ACGIH	: American Conference of Governmental Industrial Hygienists
TLV	: <i>Threshold Limit Value</i>
LCLo	: <i>Lethal concentration low</i>
PPLI	: Prasadha Pamudah Limbah Industri
PEL	: <i>Permissible Exposure Limit</i>
PP	: Process Plant
3R	: <i>Reduce, Reuse, Recycle</i>
LCA	: <i>Life Cycle Assessment</i>
ISO	: <i>International Standard Organization</i>
PROPER	: <i>Public Disclosure Program for Environmental Compliance</i>
LCIA	: <i>Life Cycle Impact Assessment</i>
CED	: <i>Cumulative Energy Demand</i>
GWP	: <i>Global Warming Potential</i>
MO2	: Refraktori Asam
MO3	: Refraktori Netral
MO	: Refraktori Basa
C	: Karbon
	: Silikon Karbida
	: Kromium Oksida
	: Besi Oksida



Al ₂ O ₃	: Aluminium Oksida
ASTM	: <i>American Society for Testing and Materials</i>
MgO	: Magnesium Oksida
CO ₂	: Karbon Dioksida
EPA	: <i>Environmental Protection Agency</i>
4R	: <i>Reduce, Reuse, Remanufacture, dan Recycle</i>
5R	: <i>Reduce, Reuse, Remanufacture, Recycle dan Re-educate</i>
C	: Celcius
GJ	: Giga joule
CaO	: Kalsium Oksida
Fe ₂ O ₃	: Besi Oksida
SiO ₂	: Silikon Dioksida
DALY	: <i>Disability adjusted life years</i>
PAF	: <i>Potentially Affected Fraction</i>
PDF	: <i>Potentially Dissapeared Fraction</i>
MJ	: Mega joule
Eq	: <i>Equivalent</i>
UV	: Ultraviolet
WHO	: <i>World Health Organization</i>
GHG	: <i>Green House Gas</i>
PKS	: Prosedur Kerja Standard
SOP	: <i>Standard Operating Procedure</i>
IPCC	: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Vale Indonesia Tbk merupakan salah satu produsen nikel di Indonesia yang memproduksi nikel matte melalui proses *pyrometallurgical*. Proses *pyrometallurgical* meliputi pengeringan, reduksi dan kalsinasi, peleburan hingga pemurnian dan granulasi. Nikel matte hasil peleburan dimurnikan kembali pada converter dengan cara meniupkan oksigen sehingga terjadi proses oksidasi pada besi yang terkandung pada nikel matte. Proses pada converter menghasilkan nikel dengan kemurnian 75% dan terak hasil oksida yang dilanjutkan dengan proses granulasi yaitu proses dimana nikel matte disemprotkan pada air bertekanan sehingga membentuk butiran kemudian dikeringkan dan siap untuk dikemas (Chaerul dan Revrian, 2020).

Bahan tahan api sangat penting untuk produksi besi dan baja. Bahan ini digunakan dalam modul reduksi langsung, baterai oven kokas, tanur tiup, transportasi logam panas dan *pre treatment*, konverter oksigen, tanur listrik, sendok baja, degasser resirkulasi, tundish, sistem pengecoran, tanur pemanas ulang, unit perlakuan panas dan peralatan hilir lainnya. Permintaan global untuk bahan tahan api diperkirakan mencapai 46 juta ton untuk tahun 2016. Industri baja mengkonsumsi sekitar dua pertiga berat produksi refraktori. Diperkirakan bahwa bahan refraktori yang tersisa setelah digunakan adalah 30% dari bahan yang digunakan. Ini berarti sekitar 9 juta ton refraktori bekas per tahun tersedia untuk didaur ulang atau diisi ulang di tanah (Madias dan San, 2017). Refraktori adalah bahan yang sangat diperlukan untuk semua proses bersuhu tinggi, seperti produksi logam, semen, kaca, dan keramik. Refraktori adalah bahan padat yang dapat menahan suhu tinggi dan mempertahankan fungsi mekanismenya untuk jangka waktu yang diperlukan dalam semua keadaan, bahkan jika bersentuhan dengan cairan atau gas korosif. Selama penggunaan, diperkirakan 49% dari total massa

pada akhirnya dikonsumsi dalam bentuk terlarut dalam terak (Munoz et al.). Pembuangan dari bahan tahan api bekas telah menjadi masalah besar dusen logam. Masalah utama seputar pembuangan refraktori adalah



eliminasi dari komponen berbahaya dari refraktori, paling umum bahan yang mengandung krom dan flourida serta sianida dalam pelapis pot bekas. Berbagai pendekatan pencegahan polusi melibatkan perancangan ulang untuk menghilangkan atau mengurangi limbah secara signifikan, mendaur ulang atau menggunakan kembali dan pendekatan yang paling tidak bernilai, pengurangan. Ketika biaya pembuangan meningkat dan peraturan limbah berbahaya menjadi semakin ketat untuk beragam limbah industri, industri mulai menyadari potensi keuntungan dari investasi di dalam kebijakan pencegahan polusi. Pendekatan paling efektif untuk mencegah polusi, yang sering kali menghasilkan penghematan terbesar, adalah dengan merancang *zero waste*; yaitu mengembangkan suatu proses yang tidak mencipta (atau mengurangi secara signifikan) bahan limbah, atau tidak menghasilkan produk sampingan yang tidak dapat digunakan (Donald *et al.*, 1997). PT Vale Indonesia Tbk memiliki 3 buah unit converter jenis *Pierce Smith Converter* pada tahap proses pemurnian. Proses pemurnian merupakan proses akhir yang menentukan kualitas produk nikel matte sebelum dipasarkan. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kadar nikel dapur listrik (*furnace matte*) menjadi 75-78% sesuai dengan permintaan konsumen (Sampe, 2018). Industri pada umumnya dalam proses produksi menghasilkan berbagai jenis limbah, baik berupa gas, padat, dan cair (Ruhiat dan Akbar, 2015). Hal ini mengharuskan perusahaan untuk melakukan penggantian bata tahan api yang sudah menipis sehingga harus dilakukan partial reline. *Partial relines* merupakan aktifitas penggantian bata tahan api pada sebahagian area saja. Area yang dimaksud adalah area *tuyere line*. Penggantian bata tahan api ini akan dijadwalkan sesuai kondisi panjang bata (Nataniel Toding, 2016). Converter yang saat ini beroperasi menggunakan material refraktori brick jenis *Magnesia Chromite*. Refraktori yang mengandung krom bekas telah menerima perhatian daur ulang terbesar karena kekhawatiran akan toksisitas kromium. Dalam refraktori yang mengandung krom, ion krom biasanya dalam bentuk trivalent (Cr^{3+}) yang tidak beracun seperti halnya oksida krom. Namun, dalam kondisi tertentu, seperti kontak dengan oksida alkali atau alkali tanah pada suhu tinggi, beberapa



trivalent (Cr^{3+}) dapat dioksidasi menjadi kromium heksavalen (Cr^{6+}) yang acun. Senyawa Cr^{6+} relatif mudah larut dalam air sehingga meningkatkan ehatan dan membatasi pembuangannya ke tanah karena potensi pencucian

air tanah (Fang *et al.*, 1999). Refraktori brick atau dikenal dengan bata tahan api yang berfungsi untuk melindungi *shell* converter dari kerusakan akibat proses dan temperatur yang tinggi sehingga akan terjadi penipisan pada bata tahan api ini disebabkan oleh proses operasi yang sudah cukup lama. Ketika bahan refraktori telah mencapai akhir masa pakainya, bahan tersebut diganti dengan refraktori baru yang harus diproduksi dari bahan baku baru dan refraktori yang sudah tidak terpakai biasanya dibuang ke tempat pembuangan akhir yang membuang sumber daya alam yang berharga (Fang *et al.*, 1999). Dari sudut pandang lingkungan, melalui potensi manfaat yang diperoleh dari penurunan jumlah refraktori dan peningkatan tingkat daur ulang sebagian besar masih belum dinilai. Dengan demikian, secara umum diasumsikan bahwa daur ulang, dalam hal ini refraktori, dapat menghemat energi, sumber daya alam, dan emisi gas rumah kaca (GRK) (Munoz *et al.*, 2020). Sebaliknya, beberapa penelitian telah diselaraskan dengan proses daur ulang. Fang *et al.*, (1999) berfokus pada daur ulang limbah refraktori bekas melalui kuantifikasi limbah ini dan analisis teknologi daur ulang dan penggunaan kembali yang layak di Amerika Serikat. Selain itu, Hanagiri *et al.*, (2008) menganalisis kondisi teknologi daur ulang saat ini untuk refraktori di Jepang, serta tahapan proses daur ulang.

Berdasarkan tinjauan terbaru, refraktori yang paling banyak digunakan di seluruh dunia adalah lempung tahan api (46%) dan refraktori berbasis magnesita (26%). Produksi refraktori di seluruh dunia adalah sekitar 35-40 juta ton per tahun, dengan fluktuasi tahunan yang sebagian besar ditentukan oleh industri besi dan baja (Horckman *et al.*, 2019). Ada banyak produk refraktori magnesita berdasarkan komposisi kimianya, mengandung aluminium, krom, dan mengandung kalsium. Produk refraktori magnesita adalah bahan refraktori utama untuk tungku dan kiln di industri bersuhu tinggi seperti industri besi dan baja, pembuatan semen, dan metalurgi non-besi. Magnesit adalah bahan utama produksi refraktori magnesita. Pada tahun 2015, produksi global magnesit adalah 2.77×10^4 kiloton dan kapasitas produksi dunia. Perkembangan pesat industri refraktori telah menyebabkan banyak masalah lingkungan yang mengarah ke berbagai penelitian termasuk memahami

asi tanah oleh debu magnesit, kontaminasi air tanah oleh penambangan, dan produksi yang lebih bersih dari pabrik bahan tahan api magnesit. Selain itu, konsumsi energi yang lebih tinggi telah menjadi serius bagi industri



refraktori magnesia (An *et al.*, 2018). Jepang melaporkan 90% daur ulang refraktori bekas, sementara di Spanyol, penimbunan masih merupakan praktik yang tersebar luas. Namun demikian, dalam beberapa tahun terakhir, minat untuk mendaur ulang refraktori bekas telah meningkat, dimotivasi oleh sejumlah alasan yang dapat diklasifikasikan sebagai alasan ekonomi (peningkatan biaya refraktori dan pembuangan ke TPA), peraturan (peningkatan tekanan otoritas publik pada produsen untuk mengurangi pembuangan ke TPA), strategis (kekhawatiran akan keamanan pasokan, mengingat posisi pasar yang kuat di Tiongkok), dan tak kalah pentingnya, lingkungan (mengurangi timbulan limbah dan menghemat sumber daya alam) (Munoz *et al.*, 2020). Dalam beberapa tahun terakhir, masalah lingkungan yang disebabkan oleh refraktori telah menjadi perhatian penting yang dihadapi oleh industri baja. Karena kerusakan pada lapisan refraktori, sulit untuk melakukan operasi tertentu, oleh karena itu mengganti lapisan refraktori adalah penting, selama ini beberapa tahun terakhir, industri baja mendapat tekanan untuk mengurangi limbah dari refraktori. Namun, tren ini tidak hanya bertujuan untuk membantu menemukan solusi ramah lingkungan yang sangat dibutuhkan, tetapi juga dalam membantu melestarikan sumber daya mineral, konsumsi energi, dan biaya keseluruhan produksi refraktori serta meminimalkan biaya TPA untuk pengguna akhir (Jogdand, 2020). Sebagian besar pengguna refraktori menganggap penimbunan refraktori bekas sebagai strategi yang lebih ekonomis dibandingkan mendaur ulang material karena kurangnya kekuatan pendorong ekonomi dan legislatif dalam beberapa dekade terakhir. Pendekatan ini tidak hanya menyebabkan pemborosan sumber daya tetapi juga ancaman lingkungan yang serius (Xue *et al.*, 2018).

Berdasarkan lampiran IX Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup refraktori bekas yang dihasilkan dari fasilitas termal masuk dalam daftar limbah B3 kategori 2 dari sumber spesifik khusus. Proses industri yang menggunakan fasilitas termal antara lain berupa tungku bakar, *boiler*, *pot lining*,



tas sejenis. Setiap orang yang menghasilkan limbah B3 wajib melakukan manajemen Limbah B3 yang dihasilkannya. Pengelolaan limbah B3 adalah yang meliputi pengurangan, penyimpanan, pengumpulan, pengangkutan,

pemanfaatan, pengolahan, dan/atau penimbunan.

Berdasarkan data tahun 2022, jumlah timbulan limbah refraktori yang dihasilkan oleh PT Vale Indonesia Tbk sekitar 3.090-17.260 kg/reline untuk setiap converter. Limbah yang dihasilkan selanjutnya akan diangkut menuju TPS dan selanjutnya dikirim kepada pihak ketiga untuk dikelola lebih lanjut dalam hal ini PPLI (PT Prasadha Pamunah Limbah Industri).

Tabel 1 Data Timbulan Limbah Refraktori Brick Converter Tahun 2022

Tanggal Pengambilan	Converter	Equipment No.	Berat Truck + Bin Berisi (kg)	Berat Truck + Bin Kosong (kg)	Berat Material (kg)
10-Jan-22	PP- CONVERTER 2	1114 (VOLVO)	23.710	14.895	8.815
14-Jan-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	25.300	14.895	10.405
18-Jan-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	17.480	14.895	2.585
5-Feb-22	PP- CONVERTER 3	1115 (VOLVO)	19.510	14.895	4.615
2-Apr-22	PP- CONVERTER 3	1115 (VOLVO)	18.285	14.650	3.635
14-Apr-22	PP- CONVERTER 2	1115 (VOLVO)	22.115	14.895	7.220
25-Apr-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	19.855	15.390	4.465
12-May-22	PP- CONVERTER 3	1114 (VOLVO)	21.205	14.895	6.310
y-22	PP- CONVERTER 2	1115 (VOLVO)	22.800	14895	7.905
-22	PP-	1102	19.220	14.620	4.600



	CONVERTER 2	(VOLVO)			
22-Jun-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	19.880	14.895	4.985
24-Jun-22	PP- CONVERTER 4	1075 (VOLVO)	19.660	14.860	4.800
1-Aug-22	PP- CONVERTER 4	1114 (VOLVO)	19.785	14.895	4.890
18-Aug-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	21.700	14.895	6.805
14-Sep-22	PP- CONVERTER 4	1115 (VOLVO)	22.780	14.895	7.885
3-Oct-22	PP- CONVERTER 2	1114 (VOLVO)	23.215	14.895	8.320
24-Oct-22	PP- CONVERTER 3	1114 (VOLVO)	22.145	14.895	7.250
27-Oct-22	PP- CONVERTER 4	1075 (VOLVO)	22.145	14.860	3.090
17-Nov-22	PP- CONVERTER 2	1114 (VOLVO)	19.860	14.895	4.965
27-Nov-22	PP- CONVERTER 2	1114 (VOLVO)	22.300	14.895	7.405
29-Nov-22	PP- CONVERTER 3	1075 (VOLVO)	21.445	14.860	6.585
7-Dec-22	PP- CONVERTER 4	1075 (VOLVO)	22.800	14.860	7.940
16-Dec-22	PP- CONVERTER 4	1114 (VOLVO)	24.215	14.895	9.320

(Data Internal Perusahaan PT Vale Indonesia Tbk, 2022)

Dalam hal ini, proses pengolahan limbah yang dilakukan oleh pihak ketiga akan menimbulkan dampak terhadap biaya yang harus dikeluarkan oleh perusahaan serta akan menimbulkan dampak terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Pengolahan limbah refraktori brick PT Vale Indonesia Tbk



masih belum optimal saat ini dikarenakan limbah refraktori bekas chipping dari converter masih bercampur dengan refraktori brick sisa potongan yang masih baru. Proses pengolahan dari refraktori brick ini tentunya akan berdampak terhadap jumlah timbulan limbah yang dihasilkan setiap aktifitas *partial reline*.

Dalam proses pengelolaan limbah hal yang dilakukan adalah mengurangi limbah tersebut (*reduce*) dan memisahkan potensi daur ulang dari sumbernya untuk meningkatkan kualitas material supaya dapat digunakan kembali (*reuse*). Limbah yang tidak dapat dikurangi harus digunakan kembali jika memungkinkan (*recycle*). Prinsip 3R dapat membantu dalam menciptakan kehidupan berkelanjutan. Pola pikir terkait dampak konsumsi dan produksi limbah dapat mengurangi sampah dan mengurangi dampaknya terhadap lingkungan. *Reduce*, *reuse* dan *recycle* membantu menyelamatkan sumber daya alam untuk masa depan (Sukarlina dan Iphof, 2022). Minat untuk mendaur ulang sangat bervariasi antara negara dan wilayah sehubungan dengan tekanan lokal pada sumber daya dan opsi penimbunan. Berbagai program perbaikan lingkungan dapat dilakukan oleh Perusahaan untuk dapat melaksanakan kegiatan efisiensi dan produksi bersih. Minimalisasi pembuangan air limbah melalui kegiatan pengurangan, pemanfaatan, dan pengolahan limbah merupakan kegiatan yang dapat dilakukan untuk dapat mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus melakukan kegiatan efisiensi (Ruhiat dan Akbar, 2015).

Perkembangan pesat industri refraktori telah menyebabkan banyak masalah lingkungan yang mengarah ke beberapa penelitian termasuk memahami kontaminasi tanah oleh debu magnesit (Wu, 2007; Yang *et al.*, 2009), kontaminasi air tanah oleh penambangan magnesit (Batjos, 2004), dan produksi yang lebih bersih dari pabrik bahan tahan api magnesium (Li *et al.*, 2016). Namun demikian, ada kekurangan pengetahuan mengenai analisis lingkungan dari bahan-bahan ini, terutama dari sudut pandang *Life Cycle Assessment* (LCA), termasuk masa akhir dari bahan-bahan ini (Ferreira *et al.*, 2015). Proses pengolahan refraktori brick converter dan perbaikan yang dilakukan oleh perusahaan belum terukur nilai

lannya dari sisi dampak lingkungan sehingga diperlukan suatu nilai dampak untuk dapat mengetahui bagaimana pengaruh dampak an yang dihasilkan dari aktifitas yang berlangsung saat ini. Salah satu



perangkat untuk mengukur eko-efisien suatu sistem produksi adalah *life cycle assessment* (LCA). Diluar negeri kajian LCA sudah banyak digunakan secara luas, baik pada sektor pemerintahan, sektor industri, sektor bahan bangunan, sektor pembangkit listrik, maupun pengelolaan *end-of-life* dari sebuah produk. LCA saat ini sudah menjadi dokumen resmi, baik untuk kepentingan pengelolaan proses produksi maupun untuk kepentingan pengembangan inovasi hijau (Widiyanto, 2022). *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan sebuah metode berbasis *cradle to grave* (analisis keseluruhan siklus dari proses produksi hingga pengolahan limbah) yang digunakan untuk mengetahui jumlah energi, biaya, dan dampak lingkungan yang disebabkan oleh tahapan daur hidup produk dimulai dari saat pengambilan bahan baku sampai dengan produk itu selesai digunakan oleh konsumen. Setiap Langkah LCA dijelaskan dalam standar internasional (ISO 14040, ISO 14041) (Harjanto *et al.*, 2012). LCA tidak hanya merepresentasikan hasil secara kualitatif namun juga secara kuantitatif yang digambarkan melalui grafik atau diagram sehingga dengan mudah dapat terbaca oleh pengguna dalam menentukan rekomendasi secara efektif terkait pengurangan dampak lingkungan dari kegiatan tersebut (Arba dan Suyono, 2022). Analisa perhitungan dampak menggunakan software SimaPro yang biasa dipakai sebagai perangkat untuk menganalisis efisiensi penggunaan sumber daya berupa tanah, air, energi dan sumber daya alam lainnya (Rosmieka *et al.*, 2010).

Penelitian ini bertujuan untuk menilai potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan akibat proses pengolahan limbah refraktori brick converter yang dihasilkan oleh PT Vale Indonesia Tbk. Hal ini merupakan salah satu upaya untuk menciptakan produksi yang ramah lingkungan dengan mempertimbangkan dampak yang ditimbulkan serta kajian terhadap skenario pengolahan limbah yang diusulkan. Untuk itu diperlukan suatu metode yang dapat mengevaluasi proses pengolahan atau daur hidup produk sehingga dapat meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan sebagai upaya pengembangan yang berkelanjutan. Penelitian ini akan menganalisis dan membandingkan dampak lingkungan dari aktifitas



an limbah refraktori brick converter diantaranya skenario 1 merupakan ksisting, skenario 2 berupa alternatif perbaikan yaitu penggunaan kembali isa potongan refraktori brick converter sebagai proteksi pada ladle

penampung converter matte.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari kegiatan proses eksisting pengolahan refraktori brick converter di PT Vale Indonesia Tbk?
2. Bagaimana potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan pada proses alternatif perbaikan pengolahan limbah refraktori brick yang digunakan kembali (*reuse*) pada *ladle* penampung converter matte di PT Vale Indonesia Tbk?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses eksisting pengolahan refraktori brick converter di PT Vale Indonesia.
2. Menganalisa potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan pada proses penggunaan kembali refraktori brick sisa potongan pada ladle penampung converter matte di PT Vale Indonesia Tbk.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

1. Bagi peneliti dapat menambah pengetahuan dan wawasan dalam menerapkan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menganalisa potensi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh suatu proses pengolahan limbah di suatu perusahaan.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumbangsih dalam pengaplikasian ilmu lingkungan khususnya kajian terkait penggunaan LCA sebagai alternatif untuk mengidentifikasi dampak lingkungan mengenai proses pengolahan limbah.

Membantu dalam memberikan usulan perbaikan terkait sistem



pengolahan limbah melalui konsep 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*).

4. Dapat dijadikan sebagai dokumen penunjang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER).

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Untuk membatasi penelitian agar tidak menyimpang dari tujuan awal, maka ditetapkan ruang lingkup sebagai berikut:

1. Pengambilan data dilakukan di PT Vale Indonesia Tbk Sorowako, Section Converter yang berlokasi di Sorowako, Kabupaten Luwu Timur.
 2. Menggunakan data sekunder dan primer untuk serangkaian proses pengolahan limbah refraktori brick converter.
 3. Lingkup analisis sistem proses adalah *gate to gate* yang merupakan ruang lingkup yang terpendek karena hanya menilai pada proses yang memiliki nilai tambah dalam aliran produksi. Tidak memperhitungkan kondisi *upstream* dan *downstream* dari suatu tahapan proses produksi.
 4. Unit fungsional yaitu 1 kg refraktori brick baru yang digunakan dalam sekali partial untuk salah satu converter.
 5. Kategori dampak yang akan dinilai berdasarkan perbandingan kedua skenario sebagai berikut:
 - a. Skenario 1 adalah kondisi eksisting dimana semua limbah refraktori brick yang dihasilkan dalam sekali partial reline dikirim ke pihak ketiga dalam hal ini PPLI untuk dikelola lebih lanjut.
 - b. Skenario 2 adalah alternatif perbaikan dengan penggunaan kembali (*reuse*) brick sisa potongan pada *ladle* penampung converter matte yang berfungsi sebagai *lining protection*.
 6. *Software* yang digunakan untuk analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah SimaPro v.9.3.0.3. Pemilihan ini didasarkan pada ketersediaan *database inventory* dan penilaian dampak (LCIA) di software tersebut. Selain itu, *software* SimaPro ini tersedia dalam bahasa Inggris dan telah banyak digunakan dalam jurnal internasional dan juga tersedia lisensi yang gratis untuk kebutuhan studi.
- Metode penilaian dampak lingkungan (LCIA) yang digunakan pada



SimaPro adalah metode metode CML-IA baseline V3.05 yang terdiri dari 11 kategori dampak midpoint. Penelitian ini akan difokuskan terhadap 4 kategori dampak yaitu *Abiotic depletion (fossil fuels)*, *Global warming (GWP100a)*, *Photochemical oxidation*, dan *Eutrophication* serta *Cumulative Energy Demand (CED)* yang terdiri dari 2 kategori dampak yaitu *Non-renewable, fossil* dan *renewable, water*. Pemilihan kategori dampak ini berdasarkan studi literatur dan yang berkaitan erat dengan subyek penelitian. Sesuai dengan Permen LHK 01/2021 kategori dampak yang wajib dikaji adalah: *Global Warming Potential* (nilai GWP, material kontributor terbesar, di unit proses mana), Potensi penipisan Ozon, Potensi Hujan Asam, Potensi Eutrofikasi, Penggunaan energi (*Cumulative Energy Demand*).

8. Satuan unit fungsi yang digunakan dalam kajian LCA ini adalah kg total brick per partial reline.
9. Penilaian dampak dilakukan sebanyak 3 kali, meliputi *characterization*, *normalization*, dan *weighting*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Refraktori

Refraktori adalah bahan anorganik bukan logam yang sukar meleleh pada temperatur tinggi dan digunakan dalam industri temperatur tinggi seperti bahan tungku, dan sebagainya. Material refraktori sangat diperlukan untuk banyak industri proses. Material ini melapisi *furnace, tundish, ladle* dan sebagainya. Material ini juga digunakan sebagai *nozzle, spout, dan sliding gate*. Biaya untuk pembelian dan instalasi refraktori adalah faktor yang menentukan dalam biaya proses secara keseluruhan. Kegagalan (*failure*) material refraktori ketika digunakan dalam suatu proses dapat berarti suatu bencana. Material refraktori diharapkan dapat tahan terhadap temperatur tinggi, tahan terhadap korosi slag cair, logam cair dan gas-gas agresif, siklus termal (*thermal cycling*), tahan terhadap benturan dan abrasi dengan hanya sedikit perawatan. Banyak orang bekerja di Industri yang menggunakan refraktori tetapi hanya sedikit yang mengerti tentang material ini, sehingga pemborosan biaya tidak dapat dihindari. Refraktori didefinisikan sebagai material konstruksi yang mampu mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada temperatur sangat tinggi dibawah beberapa kondisi seperti tegangan mekanik (*mechanical stress*) dan serangan kimia (*chemical attack*) dari gas-gas panas, cairan atau leburan dan semi leburan dari gelas, logam atau slag. Dengan kata lain refraktori adalah material yang dapat mempertahankan sifat-sifatnya yang berguna dalam kondisi yang sangat berat karena temperatur tinggi dan kontak dengan bahan-bahan yang korosif.

Refraktori dibuat dari berbagai jenis material terutama keramik yang mana termasuk bahan-bahan seperti alumina, lempung (*clay*), magnesia, *chromit, silicon* karbida dan lain-lain. Untuk dapat melayani aplikasi yang diminta, refraktori memerlukan sifat-sifat tertentu. Sifat-sifat ini diantaranya titik lebur yang tinggi, kekuatan yang bagus pada temperatur tinggi, tahan terhadap degradasi, mudah dan biaya masuk akal.



Material refraktori berdasarkan bentuknya dapat dibagi dua yaitu menjadi bata dan monolitik (*unshaped*). Bentuk-bentuk bata refraktori tersedia dalam

banyak bentuk dan ukuran, antara lain: lurus, kecil, kubah, belahan, tabung, dan lain-lain. Sedangkan untuk refraktori monolitik merupakan campuran butiran serbuk mineral (agregat) material refraktori yang kering dengan bahan pengikat (*binder*) baik cair maupun bahan kimia cair lainnya yang berfungsi sebagai pengikat, sehingga diperoleh campuran yang homogen dan bersifat plastis apabila bercampur dengan air dan digunakan segera setelah proses pencampuran dilakukan. Refraktori yang baik diharapkan tidak memiliki pori-pori, bersamaan dengan komposisi fasa, dan porositas merupakan faktor yang sangat penting untuk diperhatikan selama pembuatan produk refraktori. Mengurangi porositas akan meningkatkan kekuatan dan tahanan terhadap korosi. Berdasarkan bentuknya refraktori dapat dibagi ke dalam empat kategori, yaitu:

- 1) Bata api refraktori (*Refractory Brick*)
- 2) *Castable*/beton refraktori (*Refractory Castable*)
- 3) Mortar refraktori (*Refractory Mortars*) dan
- 4) Refraktori *anchor*

Kriteria dalam pemilihan yang harus dimiliki oleh refraktori yang umum digunakan untuk dapur jenis *crucible*, yaitu memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- 1) Tidak melebur pada suhu yang relatif tinggi.
- 2) Sanggup menahan panas lanjutan yang tiba-tiba ketika terjadi pembebanan suhu.
- 3) Tidak hancur di bawah pengaruh tekanan yang tinggi ketika digunakan pada suhu tinggi.
- 4) Mempunyai koefisien termal yang rendah sehingga dapat memperkecil panas yang terbuang.

Refraktori dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan:

- a. Komposisi kimia penyusunnya, terdiri dari: refraktori asam (MO_2) refraktori netral (MO_3), refraktori basa (MO), serta refraktori khusus seperti C, SiC, Borida Karbida, Sulfida dan lainnya.
- b. Metode pembentukannya: refraktori yang dibentuk dengan tangan (*hand olded*), refraktori yang dibentuk secara mekanik (tekanan tinggi), fraktori yang dibentuk melalui cetak tuang, dan lainnya. Jenis lainnya ialah refraktori yang berupa serbuk, seperti *castable*, dan *gun mix* mortar.



- c. Komposisi mineral penyusunnya, seperti *corundum*, silika, tanah liat *mullite*, magnesite dan lainnya.

Beberapa persyaratan umum lain dari bahan refraktori adalah tahan terhadap perubahan temperatur secara tiba-tiba, konservasi panas dan koefisien ekspansi termalnya rendah. Refraktori harus tahan terhadap abrasi, gas-gas panas dan reaksi kimia antara refraktori dan bahan yang berhubungan dengan refraktori pada suhu tinggi. Refraktori yang digunakan sebagai bahan dalam pembuatan dinding tungku peleburan logam bersifat isolator termal. Salah satu sifat dasar yang diperlukan bahan isolasi adalah hantaran termal yang rendah. Sifat umum refraktori adalah:

1. Tahan terhadap suhu tinggi
2. Bersifat isolator
3. Tahan terhadap kejutan termal
4. Tahan korosi slag asam dan basa
5. Tahan terhadap abrasi

Jenis refraktori berdasarkan komposisi kimianya ada 3 yaitu:

1. Refraktori Asam

Bahan yang termasuk golongan refraktori asam adalah kuarsa dan silika. Silika akan memuai pada temperatur tinggi sehingga tidak akan ada kebocoran pada permukaan dinding kontak refraktori dengan bahan leburan. Refraktori asam mempunyai keunggulan harganya yang murah dan bahan leburan tidak terkontaminasi oleh bahan refraktori pada lapisan dinding tungku. Kekurangan refraktori asam adalah tidak memiliki ketahanan yang baik terhadap terak (*slag*) dan konduktivitas termal yang rendah sehingga panas yang hilang karena konduksinya kecil.

2. Refraktori Netral

Bahan yang termasuk golongan refraktori netral adalah *spinel* FeO, Cr₂O₃ dan kromit. Cr₂O₃ yang tereduksi menjadi krom masuk ke dalam leburan menjadikan lapisan dinding tungku lebih mudah aus. Ketahanan refraktori netral terhadap terak (*slag*) yang mengandung FeO tidak sebaik refraktori basa. Jenis refraktori netral yang banyak digunakan adalah spinel. Bahan utama alumina (Al₂O₃). Refraktori alumina tinggi (Al₂O₃) memiliki kandungan alumina di atas 47,5% hal ini sesuai menurut standar



ASTM dan digunakan temperatur operasi mencapai 2050°C. Beberapa kelompok refraktori yang lain adalah *mullite*, *alumina-chrome*, *alumina-carbon*. Produk refraktori alumina tinggi dengan kandungan alumina antara 70-78% dimana fasanya adalah mullite termasuk kategori refraktori mullite alumina tinggi. Penggunaan refraktori alumina biasanya terdapat pada tungku peleburan baja, besi cor, keramik, kaca, *rotary kiln*, dan lain-lain.

3. Refraktori Basa

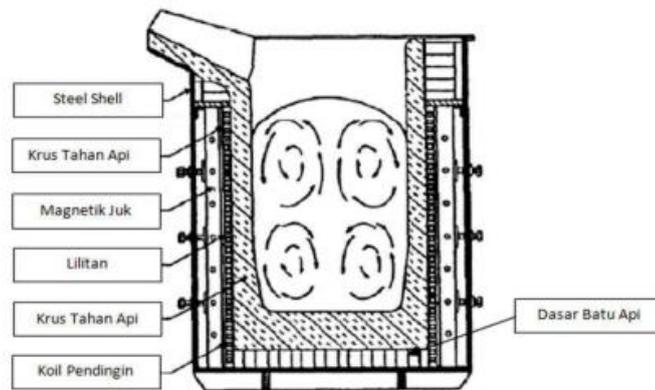
Istilah refraktori basa adalah penggolongan refraktori secara umum yang bahan bakunya terbuat dari oksida-oksida yang bersifat basa, atau yang penggunaannya dalam lingkungan kondisi operasi basa. Alasan dari penggunaan refraktori basa, antara lain karena kemampuan operasinya pada temperatur tinggi dan memiliki ketahanan terhadap slag basa, tahan terhadap korosi, memiliki kekuatan mekanik yang tinggi. Oleh karena itu refraktori yang mengandung magnesia (MgO), *magnesia-chrome*, *magnesia-spinel*, *magnesia-carbon*, *dolomite*. Penggunaan refraktori basa terdapat pada tungku busur listrik, tungku sebur oksigen, *hot metal car*, dan lain-lain (Rahmat, 2015).

Bahan yang termasuk golongan refraktori basa adalah magnesia dan magnesit (MgO). Pada saat temperatur tinggi magnesia akan menyusut yang mengakibatkan retakan pada permukaan kontak, meskipun retakan yang dihasilkan halus tetapi retakan akan berlanjut sampai ke lilitan tungku induksi dan menyebabkan kerusakan tungku. Kelemahan refraktori jenis ini adalah tingginya kontaminasi bahan refraktori terhadap leburan akibat dari logam yang tertinggal di dalam retakan setelah tungku berhenti beroperasi.

Sisa leburan tersebut ikut ke dalam peleburan selanjutnya yang akan mengubah spesifikasi hasil peleburan.

Salah satu aplikasi bahan refraktori yaitu sebagai tungku peleburan logam. Tungku peleburan terdapat beberapa jenis antara lain tungku induksi, tungku kupola dan tungku krusibel (Sari, 2019).





Gambar 1 Tungku induksi (Rahmat,2015)

Pembuatan *lining* yang sangat diperhatikan adalah bahan refraktori untuk membuat batu tahan api pada lining tersebut. Refraktori digunakan oleh industri metalurgi di lapisan internal tungku kiln, reaktor dan pengangkut lainnya untuk menampung dan mengangkut logam dan terak.

Pemakaian (keawetan atau umur pakai) dari bahan refraktori ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya harus tahan terhadap temperatur tinggi dan juga harus *inert* atau tidak bereaksi secara kimia dengan leburan bahan padat dan gas yang bersinggungan dengannya. Maka dari itu, untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas kinerja dari refraktori yang ada di industri-industri yang menggunakan tungku atau dapur peleburan untuk bahan logam maupun non-logam, diperlukan bahan baku refraktori yang memiliki stabilitas kimia dan fisika yang dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang tinggi (di atas 1400°C) (Erliyanti, 2019).

Tabel 2 Jenis-Jenis Refraktori

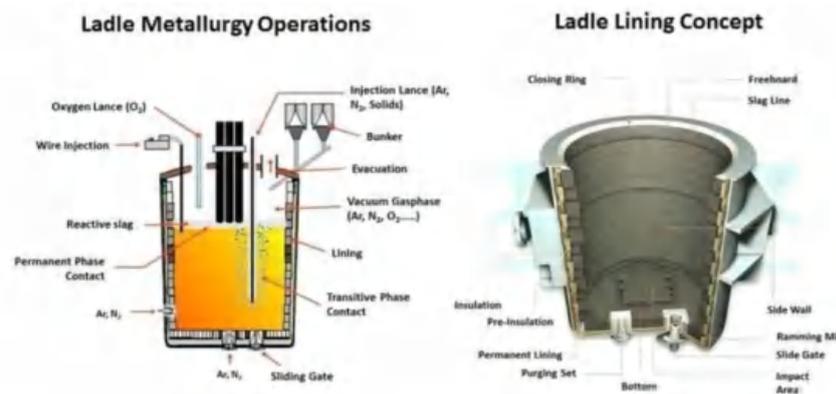
<i>Acid</i>	<i>Basic</i>	<i>Neutral</i>	<i>Special</i>
<i>Fire brick</i>	<i>Magnesite</i>	<i>Chromite</i>	<i>Pure alumina</i>
<i>Semi silica</i>	<i>Dolomite</i>	<i>Carbon</i>	<i>Zirconthoria</i>
<i>Silica</i>	<i>Chore</i>	<i>Grafit</i>	<i>Spinel</i>
	<i>Magnesite</i>	<i>Silicon carbide</i>	
	<i>Chrome</i>		
	<i>Forsterite</i>		

iyanti, 2019)



2.1.1 Penyiapan Refraktori dalam Industri Metalurgi

Aplikasi material refraktori dalam industri metalurgi meliputi *blast furnace*, *basic oxygen furnace (BOF)*, *electric arc furnace (EAF)*, *ladle furnace (LF)*, *Argon oxygen decarburization (AOD)*, bejana baja tahan karat, dan berbagai jenis oven/tungku lainnya. Sebagai contoh gambar 2. Batu bata ditempatkan di atas satu sama lain untuk membuat dinding tahan api. Dinding dibangun secara berbeda berdasarkan kondisi suhu dan waktu proses. Jenis refraktori dan posisi jenis batu bata tertentu memainkan peran penting. Warna batu bata yang berbeda menandakan jenis refraktori yang berbeda berdasarkan properti yang dibutuhkan.



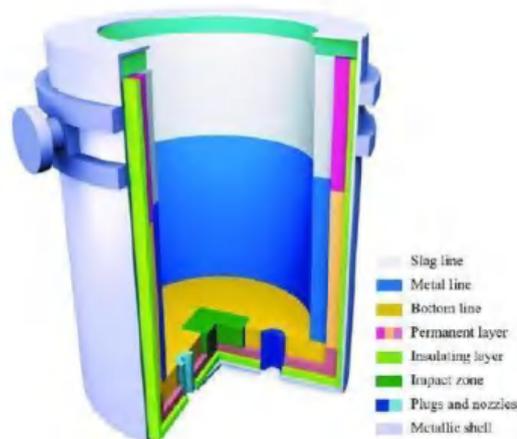
Gambar 2 Operasi Metalurgi & Konsep Pelapisan (Jogdand, 2020)

Refraktori biasanya mahal dan kerusakan/perubahan dapat mempengaruhi waktu produksi dan dalam beberapa kasus, produk itu sendiri. Oleh karena itu, refraktori harus diperoleh dari bahan terbaik, yang dapat bertahan pada suhu yang tinggi dan abrasi mekanis. Namun, refraktori juga memiliki pengaruh yang besar secara ekonomi. Refraktori tidak hanya harus bertahan lebih lama tetapi juga memberikan hasil yang baik dari segi performa. Namun demikian, kedua persyaratan tersebut tidak dapat dipenuhi pada saat itu. Oleh karena itu, perusahaan terus berusaha menghadirkan variasi dalam proses dan menghasilkan refraktori.

Lapisan yang berbeda dalam lapisan tahan api memainkan peran penting dan pengaruh proses pembuatan baja pada umur refraktori. Gambar 3 menunjukkan konfigurasi lapisan sendok baja yang khas. Lapisan dan zona yang berbeda disorot warna yang berbeda. Dalam hal ini, setiap bagian secara khusus kan untuk memenuhi kriteria tertentu selama proses. Demikian pula, roses lainnya dilapisi dengan kombinasi bahan batu tahan api yang



diinginkan berdasarkan zona dan kondisi operasi.



Gambar 3 Konfigurasi lapisan sendok baja (Jogdand, 2020)

2.1.2 Mengapa dan bagaimana mendaur ulang refraktori?

Dalam beberapa tahun terakhir, masalah lingkungan yang disebabkan oleh refraktori telah menjadi perhatian penting yang dihadapi oleh industri baja. Karena kerusakan pada lapisan refraktori, sulit untuk melakukan operasi tertentu, oleh karena itu penggantian lapisan refraktori menjadi penting. Selama beberapa tahun terakhir, industri baja mendapat tekanan untuk mengurangi limbah dari refraktori. Namun, tren ini tidak hanya bertujuan untuk membantu menemukan solusi ramah lingkungan yang sangat dibutuhkan untuk refraktori bekas, tetapi juga dalam membantu melestarikan sumber daya mineral, konsumsi energi, dan biaya produksi refraktori secara keseluruhan, serta meminimalkan pengeluaran biaya TPA bagi pengguna akhir.

Selain itu, demi kepentingan industri, harus ada pengurangan limbah dari refraktori. Salah satu langkahnya adalah dengan memperpanjang usia batu bata yang digunakan untuk lapisan refraktori. Versi terbaru dari Petunjuk Kerangka Kerja Limbah Komisi Eropa 2008/98/EC (EC,2008) menetapkan urutan prioritas untuk pengelolaan limbah. Langkah-langkah yang termasuk di dalamnya adalah pencegahan, mempersiapkan penggunaan kembali, daur ulang, pemulihan lainnya (misalnya energi, pemulihan sumber daya) dan terakhir pembuangan.

Survei literatur menekankan pada pemilahan refraktori. Hal ini penting untuk mempertahankan daur ulang semaksimal mungkin dan meminimalkan limbah residu, yang dapat dimanfaatkan di masa depan. Ditandai bahwa untuk membuat siklus daur ulang menjadi mudah, produsen baja harus melakukan



pemilahan sebelum mengirimnya ke pendaur ulang eksternal setelah *scrapping* refraktori bekas.



Gambar 4 Skenario sebelum dan sesudah pemilahan limbah refraktori (Jogdand, 2020)

Motivasi untuk mendaur ulang termasuk perlindungan sumber daya alam yang berkelanjutan. Daur ulang dan penggunaan kembali dapat mengurangi eksploitasi sumber daya yang diperlukan dalam prosesnya, sehingga dapat menyelamatkan alam. Penting untuk mengolah limbah dari pabrik baja untuk menurunkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari produksi bahan baku. Tahapan yang disederhanakan yang terlibat untuk mendaur ulang refraktori digambarkan pada Gambar 5. Daur ulang juga menghasilkan pengurangan volume TPA dan menghemat biaya TPA. Bersamaan dengan itu, tanggung jawab material yang ditimbun di tanah juga berkurang.



Gambar 5 Daur ulang refraktori dalam tahapan yang disederhanakan (Jogdand, 2020)

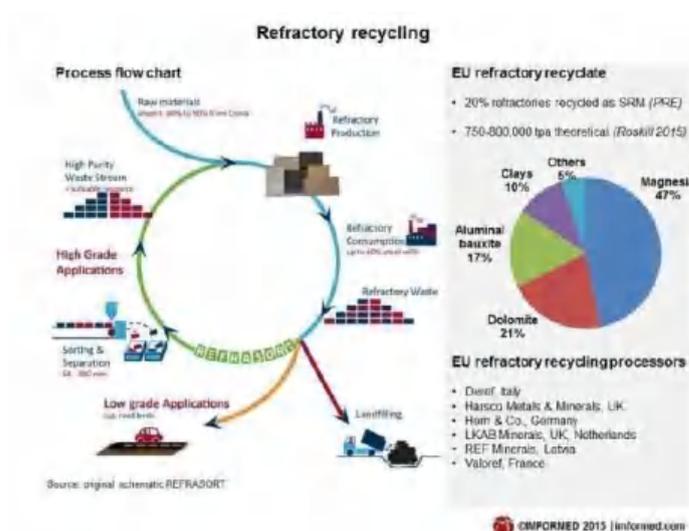


Daur ulang memiliki efek positif karena menghemat biaya bahan baku dan meningkatkan keseimbangan lingkungan. Juga memperkenalkan produk baru di pasar baru dan kerja sama yang lebih antara pemasok refraktori dan pabrik baja. Selain itu, hal ini membantu perusahaan untuk berinvestasi dalam pengenalan spesialis daur ulang untuk meningkatkan perawatan dan distribusi bahan daur ulang. Juga membantu untuk tetap berada di depan peraturan EPA yang terus berubah tentang bahan TPA.

2.1.3 Proyek terbaru tentang pengelolaan limbah refraktori

1. Proyek SRM REFRASORT

Dimulai pada bulan November 2013 dan dilaksanakan hingga Oktober 2016 dengan fokus pada pemilahan otomatis refraktori bekas untuk daur ulang bermutu tinggi. Proyek REFRASORT berkonsentrasi pada delapan jenis refraktori yang mewakili 95% dari semua refraktori yang digunakan dalam industri baja, yang juga mencakup 60% dari semua pemanfaatan refraktori di seluruh dunia. Delapan jenis tersebut dikelompokkan menjadi tiga utama: berbasis magnesia, berbasis doloma dan berbasis alumina. Diagram alir daur ulang refraktori pada Gambar 6 menggambarkan skenario pengelolaan limbah dengan implementasi proyek REFRASORT.



Gambar 6 Strategi daur ulang refraktori proyek REFRASORT (Jogdand, 2020)



Dalam beberapa tahun terakhir, Sidenor (produsen baja Spanyol) telah berkomitmen secara luar biasa untuk mencapai keunggulan dalam pengelolaan limbah refraktori strategis.

Pendekatan nol limbah refraktori Sidenor mengalami kemajuan yang luar biasa setelah proyek penelitian Eropa yang baru diusulkan di RMF'18 disetujui. Proyek-proyek tersebut diberi judul dengan singkatan "5RefAct" dan "E-CO-LadleBrick" dengan kolaborasi program Uni Eropa LIFE dan RFCS.

2. Proyek LIFE 5RefAct

Tujuan dari proyek ini adalah untuk membangun ekonomi sirkular dan valorisasi limbah refraktori. Kerangka kerja ini mencakup konsep tambahan untuk mendidik ulang pendekatan tradisional '4R' (*Reduce, Reuse, Remanufacture* dan *Recycle*). Oleh karena itu, diperkenalkanlah paradigma '5R' yang baru (Gambar 7) untuk mencapai valorisasi limbah refraktori dalam industri besi dan baja. Paradigma 5R ini membantu mengembangkan manajemen yang sistematis dan mendasar untuk semua jenis limbah refraktori yang dihasilkan di Pabrik Sidenor Basuri.



Gambar 7 Paradigma "5R" yang digunakan oleh Sidenor untuk Proyek 5RefAct (Jogdand, 2020)

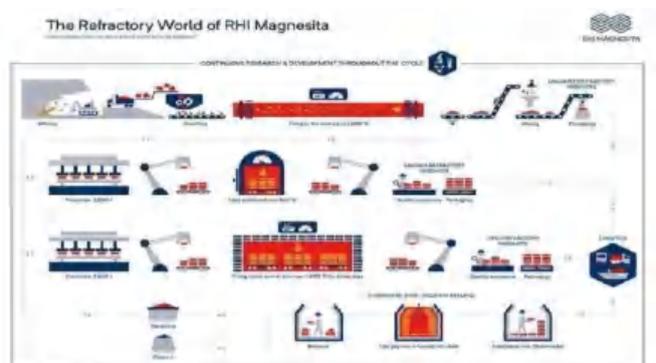


Tujuan khusus LIFE 5RefrAct meliputi pembentukan nilai tambah yang tinggi pada bahan refraktori daur ulang, menghilangkan penimbunan tanah untuk mengurangi pencemaran tanah dan lapangan kerja, serta mengurangi nisis CO₂. Manfaat unik yang dicapai adalah:

- Penurunan sebesar 81,5% dalam jumlah sampah yang disimpan di tempat pembuangan akhir. Sebelumnya hanya 7% yang didaur ulang dan sisanya dibuang ke tanah.
- Peningkatan 66,1% dalam persentase bahan tahan api yang digunakan kembali (secara langsung atau setelah pemulihan).
- Pengurangan 7,9% dalam penggunaan CRM dan menghindari semua dampak terkait.

3. RHI Magnesita

RHI Magnesita adalah perusahaan global di bidang refraktori. Perusahaan ini dikenal luas dalam pembuatan produk refraktori dan memberikan solusi kepada pelanggan mereka (misalnya, bagaimana melindungi tungku dari dampak termal, kimia, dan mekanis, dll). Umumnya, bahan dasar yang digunakan untuk membuat batu bata dan pelapisnya adalah magnesita dan dolomit. Setelah penambangan, magnesit dihancurkan secara merata untuk membuatnya menjadi bentuk butiran dan dengan memasukkannya ke dalam tanur sekitar 1800°C, sifat tahan api tercapai. Sedangkan bahan lepas yang dicampur dengan pengikat kemudian ditekan dan ditempa pada kisaran 350 hingga 1800°C di dalam tanur. Selain itu, bahan tahan api diproduksi dan dipasang sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Bahan refraktori yang digunakan juga didaur ulang dan bahan yang tidak dapat didaur ulang dibuang ke tempat pembuangan akhir. Gambar 8 menunjukkan keseluruhan proses pembuatan refraktori hingga daur ulang.



Gambar 8 Diagram alir proses pembuatan refraktori hingga daur ulang di RHI Magnesita (Jogdand, 2020)

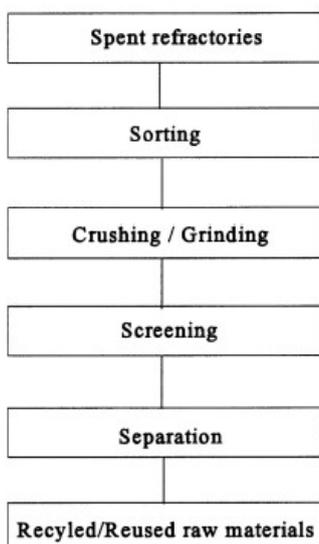


2.1.4 Tinjauan Literatur Tentang Daur Ulang Refraktori

Sangat sedikit yang telah dilaporkan dalam literatur di bidang daur ulang refraktori bekas. Hal ini tampaknya karena belum ada kekuatan pendorong ekonomi atau lingkungan yang kuat untuk daur ulang refraktori. Sebagian besar refraktori relatif murah untuk diganti dan tidak mahal untuk ditimbun karena tidak menimbulkan risiko lingkungan yang besar.

Namun, beberapa perusahaan tertarik untuk mendaur ulang refraktori bekas sebagai metode untuk meminimalkan pembuangan limbah mereka secara signifikan. Program daur ulang refraktori yang khas akan mencakup beberapa langkah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, tergantung pada bahan refraktori tertentu yang sedang diproses. Langkah penting adalah menyortir refraktori untuk mencegah pencampuran berbagai jenis yang akan membuat proses benefisi menjadi lebih mahal, bahkan tidak mungkin. Setelah penyortiran, refraktori biasanya dihancurkan untuk membebaskan agregat refraktori dari logam, terak, atau kotoran lain yang mungkin telah menembus lapisan. Penyaringan digunakan untuk memastikan bahwa material telah direduksi menjadi ukuran yang sesuai untuk dibebaskan. Dalam beberapa kasus, perbedaan antara kemampuan menggiling material di dalam limbah menghasilkan ukuran dan bentuk yang berbeda setelah dihancurkan. Penyaringan dapat digunakan untuk memisahkan bahan ulet yang lebih besar dan tidak beraturan (tipikal penetrasi logam) dari bahan rapuh (refraktori). Teknik pemisahan lain yang memungkinkan termasuk pemisahan magnetik, pencucian, pengapungan, dan pemisahan densitas tergantung pada sistem refraktori dan jenis pengotor.





Gambar 9 Diagram alir yang disederhanakan dari langkah-langkah utama dalam daur ulang refraktori (Fang *et al.*, 1999)

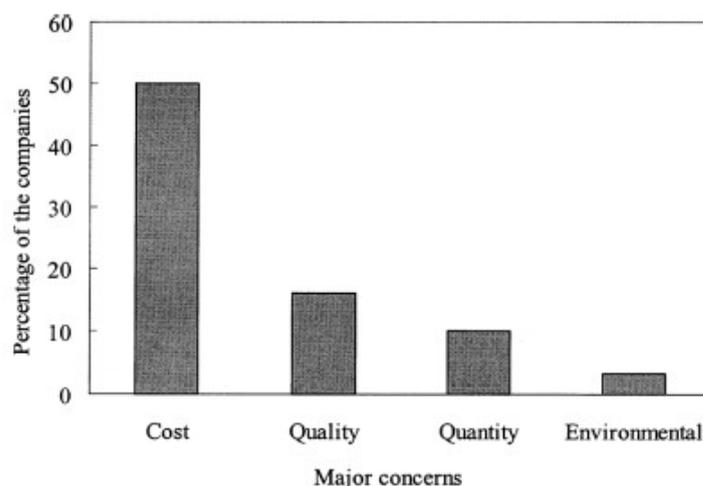
2.1.5 Kepentingan dan perhatian Perusahaan terhadap daur ulang

Hampir separuh dari peserta survei berpendapat bahwa mendaur ulang refraktori bekas tidak akan efektif dari segi biaya. Meskipun hampir semua perusahaan menunjukkan minat untuk mendaur ulang, sebagian besar hanya akan mendaur ulang dengan biaya yang kurang dari atau sama dengan praktik saat ini. Biaya TPA untuk pembuangan limbah yang tidak berbahaya relatif murah, terutama karena ditemukan bahwa limbah refraktori sering kali menarik bagi perusahaan TPA sebagai penutup. Kombinasi biaya pembuangan yang rendah, bahan baku refraktori yang murah, dan jumlah kecil yang sering dihasilkan telah mengarahkan sebagian besar perusahaan pada kesimpulan bahwa tidak ada kekuatan pendorong ekonomi untuk mendaur ulang. Namun beberapa perusahaan mengindikasikan bahwa mereka akan mempertimbangkan untuk menambah biaya untuk memulai program daur ulang, tetapi kekenomian jangka panjang pada akhirnya harus mendekati biaya yang saat ini.

beberapa perusahaan khawatir bahwa produk refraktori yang terbuat dari daur ulang akan memiliki kualitas yang lebih rendah daripada yang



mereka beli saat ini sehingga mengurangi masa pakai refraktori dan dampak ekonomi dan lingkungan yang negatif. Kekhawatiran ini beralasan berdasarkan hasil sebelumnya yang menunjukkan bahwa bahan daur ulang memiliki kualitas yang lebih rendah karena tingkat pengotor yang lebih tinggi. Sifat-sifat penting seperti kekuatan, refraktori, dan ekspansi termal dapat terpengaruh secara negatif oleh keberadaan oksida kontaminan yang biasanya terkait dengan refraktori bekas. Penggunaan kembali bahan tahan api dalam aplikasi di mana kualitas bahan tidak akan berdampak buruk pada masa pakai produk.



Gambar 10 Masalah umum dalam mendaur ulang refraktori bekas (Fang *et al.*, 1999)

Beberapa perusahaan khawatir bahwa mendaur ulang refraktori mungkin memiliki dampak lingkungan yang lebih negatif daripada praktik pembuangan saat ini. Mereka percaya bahwa penimunan refraktori yang tidak berbahaya relatif tidak berbahaya dan daur ulang dapat menghasilkan debu, pembebasan konstituen berbahaya, dan polusi yang terkait dengan produksi energi yang dibutuhkan untuk daur ulang.

Ancaman lain terhadap daur ulang bahan tahan api adalah kurangnya kejelasan dan konsistensi undang-undang mengenai penanganan, pengolahan dan pengangkutan bahan limbah melintasi batas negara, dan beban administratif. Kemajuan teknis dapat berkontribusi untuk mengatasi ancaman ini. Penyortiran otomatis misalnya, berpotensi menjadikan proses daur ulang lebih murah dan lebih dapat diandalkan, sehingga menghasilkan kualitas lebih tinggi dan dapat diverifikasi. Sistem seperti ini juga mampu



menangani aliran masukan yang lebih beragam, tanpa pengetahuan apriori, dan memungkinkan pengumpulan berbagai sumber untuk mencapai massa kritis. Dengan sistem ini dapat meningkatkan daya saing biaya daur ulang refraktori. Analisis *Life Cycle Cost* (LCC) yang dilakukan oleh VITO dalam kerangka proyek REFASORT menunjukkan bahwa sistem identifikasi berbasis LIBS bisa sangat menguntungkan, dengan periode pengembalian di bawah satu tahun, bahkan jika nilai pecahan yang diurutkan jauh lebih rendah daripada nilai pecahan yang diurutkan. Kemurnian refraktori bekas dapat ditingkatkan secara signifikan bahkan sebelum diproses dengan penghancuran refraktori secara selektif pada akhir masa pakainya. Hal ini menjadi rumit karena keterbatasan waktu dan penggunaan alat berat, namun memerlukan penyelidikan lebih lanjut. Kemurnian yang lebih tinggi memiliki dampak positif yang kuat pada laju daur ulang, karena hal ini memungkinkan proporsi fraksi daur ulang yang lebih tinggi ditambahkan ke dalam campuran tahan api. Namun, potensi manfaat yang ada saat ini terhambat oleh kecenderungan industri yang hanya menggunakan baha daur ulang yang terkenal dengan kualitas terbaik, meskipun bahan dengan kualitas lebih rendah sudah cukup untuk menghindari risiko. Untuk mencapai potensi penuh dari daur ulang refraktori, jenis refraktori yang tidak umum daur ulang saat ini juga harus digunakan. Hal ini memerlukan kerja sama antara produksi refraktori dan industri pengolahan untuk mengembangkan formulasi baru dan menunjukkan ketergantungan mereka di lapangan.

Produksi refraktori sangat bergantung pada bahan baku berkualitas tinggi, yang banyak diantaranya semakin sulit didapat, dan harga pun meningkat. Sementara itu, sebanyak 28 juta ton refraktori bekas dihasilkan setiap tahunnya, dan hanya sebagian kecil yang didaur ulang menjadi refraktori. Daur ulang refraktori baru mulai dikembangkan dalam dua dekade terakhir, dan pada awalnya Sebagian besar berfokus pada pengurangan limbah dan biaya pembuangan sampah terkait. Dalam sepuluh tahun terakhir, daur ulang bernilai

i pada refraktori baru telah mendapatkan perhatian karena potensinya baik dari segi ekonomi (bahan baku lebih murah, biaya pengolahan rendah) dan lingkungan (permintaan energi lebih rendah dan emisi CO₂



dibandingkan dengan bahan baku). Kelayakan teknis penggunaan kembali tersebut telah terbukti untuk banyak jenis refraktori, namun sejauh ini hanya diterapkan secara luas untuk sejumlah material yang sangat terbatas seperti MgO-C. Salah satu hambatan utama adalah jaminan kualitas fraksi daur ulang, yang sangat terkait dengan pemilahan refraktori bekas yang tepat. Teknologi terancang dalam industri daur ulang adalah penyortiran manual, yang sangat rawan kesalahan dan memerlukan pengetahuan apriori. Hal ini secara efektif membatasi jumlah pecahan yang tersortir dengan baik yang tersedia di pasar dan menimbulkan sikap khawatir dari calon pembeli. Kemajuan teknis seperti penyortiran otomatis berpotensi meningkatkan kualitas dan ketersediaan refraktori daur ulang, namun memerlukan pengembangan dan investasi lebih lanjut. Pada saat yang sama, produsen dan pendaur ulang refraktori harus bekerja sama untuk mengembangkan formulasi baru untuk produk refraktori berdasarkan bahan daur ulang. Pengguna akhir refraktori juga harus bersedia menerima refraktori yang diproduksi dengan bahan daur ulang, sehingga memerlukan perubahan pola pikir.

Meskipun demikian, beberapa jenis refraktori mungkin akan tetap tidak cocok untuk didaur ulang dalam refraktori karena masalah teknis (misalnya hidrasi doloma) atau nilainya yang rendah (misalnya chamotte) yang tidak bergantung pada kualitas fraksi yang disortir. Untuk meningkatkan keekonomian proses daur ulang secara keseluruhan, dan mengoptimalkan keseimbangan material material tersebut masih harus digunakan dalam aplikasi di luar industri produksi refraktori, seperti agregat dasar jalan atau fluks. Namun, tantangannya adalah membatasi hal ini hanya pada refraktori yang tidak memiliki potensi daur ulang bernilai tinggi.

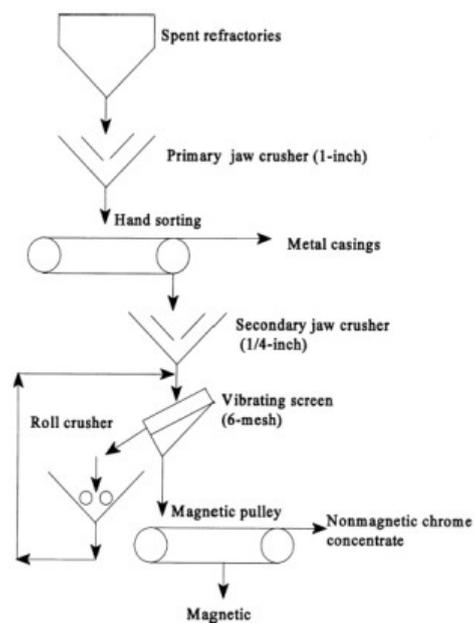
2.1.6 Mendaur ulang refraktori yang mengandung krom bekas

Pada beberapa lingkungan bersuhu tinggi dan sangat korosif, bahan pengganti terlalu mahal dan/atau menghasilkan kinerja yang buruk sehingga menjadikan refraktori yang mengandung krom sebagai pilihan terbaik. Karena toksitas dan kelauratan tingginya, kromium heksavalen memiliki toksisitas 10 kali lipat daripada kromium trivalen. Selain itu, mudah terurai dan larut dalam air. Paparan kronis kromium heksavalen yang tinggi melalui inhalasi



atau paparan oral dapat mempengaruhi saluran pernapasan, menyebabkan perforasi dan ulseras septum, bronkitis, penurunan fungsi paru-paru, pneumonia, gatal, dan nyeri hidung. Kapasitas oksidatif kromium heksavalen terkait dengan toksisitasnya, yang dapat menyebabkan kematian sel (Murti dan Sugihartono, 2020). Sebagian besar operasi produksi logam yang menggunakan refraktori yang mengandung krom beroperasi di bawah kondisi reduksi, sehingga meminimalkan risiko pembentukan krom heksavalen. Penggunaan refraktori yang mengandung krom secara terus-menerus mendorong dilakukannya daur ulang.

Upaya untuk mengidentifikasi teknik untuk mendaur ulang refraktori yang mengandung krom telah diselesaikan oleh Biro Pertambangan AS pada awal tahun 1980-an. Satu studi ditujukan untuk mendaur ulang refraktori yang mengandung krom bekas dari industri baja. Batu bata magnesium-krom limbah dari bejana argon-oksigen dekarburisasi (AOD) dan tungku busur listrik (EAF) dihancurkan, disaring dan dipisahkan secara magnetis untuk menghilangkan penetrasi baja atau selongsong baja dari konsentrat refraktori krom seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11.



Gambar 11 Diagram alir untuk mendaur ulang refraktori magnesium-krom bekas dari tungku pembuatan baja (Fang *et al.*, 1999)



Permasalahan lingkungan terkait dengan keberadaan kromium (VI) mendorong penelitian penggantian dan daur ulang refraktori Cr sejak dini. Meskipun Sebagian besar penggunaannya telah dihilangkan karena limbah berbahaya yang dihasilkan (saat ini kromit hanya menyumbang 1% dari permintaan bahan baku tahan api global), untuk beberapa aplikasi tidak tersedia alternatif yang sesuai. Di Jerman, metode pengolahan ulang batu bata magnesia-krom (MgO-Cr) bekas menjadi bahan baku tahan api dengan kombinasi komposisi dan pencucian air telah dikembangkan pada tahun 1985. Studi lain di Jepang menemukan bahwa batu bata MgO-Cr dengan bahan daur ulang tidak dapat digunakan pada lapisan aus karena masalah stabilitas kualitas akibat kandungan Cr_2O_3 yang tidak konsisten pada lapisan aslinya, namun cocok untuk lapisan permanen. Penelitian selanjutnya menyelidiki proses pengolahan refraktori Cr berdasarkan peleburan refraktori bekas yang kaya Cr_2O_3 dan tanah liat bersama-sama dalam tungku busur untuk membentuk campuran kristal $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, yang dapat digunakan sebagai bahan mentah untuk refraktori. Proses pengolahan lainnya termasuk klinker Mg-Cr dengan fusi suhu tinggi dalam EAF dan produksi bahan tahan api Cr dengan pengurangan jumlah kromium heksavalen dengan menggabungkan bahan tahan api bekas yang mengandung Cr dengan C-mengandung bahan mentah (Horckman *et al.*, 2019).

2.1.7 Aplikasi daur ulang refraktori

Open-loop recycling of refractories

Salah satu aplikasi yang paling luas untuk batu bata tahan api bekas adalah penggunaan sebagai agregat dasar jalan. Namun, pencucian logam berat seperti Cr harus dikaji sebelum digunakan untuk menghindari dampak lingkungan. Pra-hidrasi juga mungkin diperlukan untuk menghindari masalah pemuaihan selama penggunaan, khususnya untuk batu bata magnesia. Hidrasi dan disintegrasi batu bata doloma yang cepat membuatnya tidak cocok untuk penggunaan ini. Batu bata seperti doloma dan magnesia umumnya digunakan sebagai pembentuk terak atau kondisioner dalam proses metalurgi. Secara tradisional, kapur metalurgi dan dolomit ditambahkan untuk meningkatkan isi MgO terak di *Electric Arc Furnace* (EAF) untuk mengurangi serangan



refraktori. Penggantian kapur dolomit dengan bahan tahan api MgO-C bekas telah terbukti menghasilkan MgO yang lebih tinggi dalam terak dan meningkatkan massa tahan api asalkan kehati-hatian diberikan dalam menentukan dosis yang tepat. Praktik daur ulang refraktori MgO-C bekas di EAF telah diuji dan diterapkan di lokasi industry dan saat ini dianggap sebagai praktik metalurgi yang direkomendasikan. Penggunaan refraktori bekas sebagai kondisioner terak mempunyai banyak manfaat, seperti pengurangan atau bahkan penghindaran total penimbunan, penghematan energi, masa pakai refraktori yang lebih lama, dan penghematan fluks. Refraktori magnesita-krom bekas telah didaur ulang sebagai potongan untuk produksi logam krom. Batu bata doloma khususnya harus menjadi penetral tanah yang cepat dan efektif dan telah digunakan di petak bunga. Aplikasi lain yang telah disebutkan dalam literatur adalah daur ulang sebagai bahan baku fabrikasi klinker (semen) (Horckman *et al.*, 2019).

Close-loop recycling

Meskipun penerapan yang dibahas di paragraph sebelumnya merupakan pilihan berharga untuk mengurangi penimbunan sampah dan menghemat sumber daya alam, nilai ekonomi yang lebih tinggi sering kali dapat diperoleh dengan mendaur ulang sebagai bahan mentah untuk produksi refraktori baru. Selain itu, penghindaran penggunaan material baru dapat menghasilkan penghematan energi dan emisi gas rumah kaca yang signifikan. Misalnya, produksi magnesita (MgO) dari bahan baku utamanya magnesit ($MgCO_3$) merupakan langkah yang sangat intensif energi, dengan kebutuhan energi berkisar antara 6 dan 12 GJ/ton MgO tergantung pada karakteristik dan kadar air magnesit mentah.

Daur ulang sebagai bahan baku refraktori diperumit dengan praktik sobek, yang mengakibatkan campuran refraktori sulit dipisahkan menurut jenis dan kadarnya, serta kontaminasi refraktori selama tahap penggunaan sehingga

memenuhi tuntutan kualitas tinggi bahan baku tahan api. Jenis refraktori berbeda biasanya digabungkan dalam satu bejana untuk mencapai anan aus yang optimal sesuai dengan kondisi proses lokal. Ladle,



misalnya biasanya dirancang untuk menggunakan lapisan dasar atau netral (doloma, alumina) untuk area kontak baja dan refraktori yang lebih mahal namun tahan korosi (magnesia-grafit) untuk kontak terak. Tabel 3 menggambarkan perbedaan komposisi kimia antara refraktori baru dan bekas. Dapat dilihat bahwa kontak dengan logam dan terak selama masa pakai refraktori meningkatkan jumlah CaO, Fe₂O₃ dan SiO₂ dalam refraktori daur ulang. Adanya pengotor tersebut biasanya mengakibatkan penurunan ketahanan akibat terbentuknya lelehan antara Ca/Si dan Mg/Al. selain itu, agregat tahan api daur ulang cenderung memiliki porositas lebih tinggi dan kepadatan lebih rendah dibandingkan bahan asli, yang mempengaruhi sifat fisikomekanik dari refraktori seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Akibatnya, jumlah agregat tahan api daur ulang yang dapat dimasukkan ke dalam campuran tahan api terbatas, dan sangat bergantung pada kemurnian fraksi daur ulang. Oleh karena itu, pemilahan dan pengolahan mineral yang tepat diperlukan untuk mendapatkan bahan mentah berkualitas tinggi.

Tabel 3 Komposisi kimia rata-rata refraktori baru dan bekas

Sumber	Type Refraktori		MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	C
REFRASORT	MgO-C	Baru	96.2	1.3	0.7	0.8	0.9	11.0
		Bekas	94.5	1.8	0.9	1.1	1.3	10.0
	fired MgO	Baru	97.0	0.8	0.4	1.3	0.4	0.1
		Bekas	90.0	2.0	1.5	1.5	3.5	
	fired doloma	Baru	39.0	59.0	1.0	0.5	1.0	
		Bekas	35.0	55.0	3.0	3.0	4.0	
	Doloma-C	Baru	39.0	58.0	0.6	0.6	0.9	5.3
		Bekas	37.0	59.0	0.7	1.4	1.3	4.6
	fired andalusite	Bekas	0.3	<0.15	0.9	59.0	38.0	
		Baru	0.7	0.4	1.6	58.0	37.0	
	fired bauxite	Baru	0.5	0.5	1.4	83.0	10.0	



		Bekas	0.7	1.0	1.8	79.0	14.0	
	fired chamotte	Baru	0.5	<0.15	1.3	43.0	53.0	
		Bekas	1.5		2.0	35.0	54.0	
Arianpour et al. (2010)	MgO-C (EAF)	Baru	84.7	<1.2	<0.5	<0.5	<0.5	12.7
		Bekas	86.1	3.6	4.7	0.7	1.7	15.3
	MgO-C (ladle)	Baru	90.5	<1.2	<0.5	<0.5	<0.5	9.3
		Bekas	79.4	6.1	1.8	5.1	3.8	9.3
Conejo et al. (2010)	MgO-C	Baru	90.7	1.7	0.7	0.8	0.7	18.2
		Bekas	74.2	2.8	0.5	1.6	1.3	17.2
Smith et al. (1999)	MgO-C	Baru	85.0					10.0
		Bekas	85.1	3.8	0.3	0.3	1.0	8.0
	Doloma	Baru	35.0	60.0				n.s
		Bekas	34.3	57.4	1.6	0.8	3.3	1.5
	Alumina monolithic	Baru				92.0		
		Bekas	5.0	0.3	0.1	89.7	2.1	

n.s.: minor amount present, not specified.
(Horckman *et al.*, 2019)

Tabel 4 Sifat fisikomekanis refraktori yang dihasilkan dengan agregat daur ulang

<i>Sources</i>		<i>Addition of recycled aggregate</i>	<i>Bulk density (g/cm³)</i>	<i>Cold crushing strength (N/mm²)</i>	<i>Apparent porosity (%)</i>
REFRASORT	MgO-C brick	0%	2.91	30	11.1
		30%	2.86	27	12.5
		50%	2.84	26	13.1
		80%	2.77	21	14.3
our et al. (2010)	MgO brick	0%	2.95	45.2	16.2
		10%	2.85	38.5	18.5



	20%	2.85	38.2	18.5
	30%	2.43	36	20
MgO ramming mix	0%	2.85	39	25
	10%	2.8	34	27
	20%	2.78	30.5	31
	30%	2.6	37	31.5

(Horckman *et al.*, 2019)

Pemanfaatan refraktori magnesium-krom bekas secara komprehensif dengan pemisahan gravitasi diikuti dengan flotasi

Pengenalan revolusi material dan material bebas krom pada lapisan tahan api telah sangat mengurangi penerapan Cr_2O_3 - mengandung refraktori. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan pada bahan tahan api bebas krom, tidak ada satupun yang dapat diterapkan secara luas di industri karena biaya dan kinerja tahan apinya. Selain itu, tidak ada alternatif bebas krom yang diuji yang dapat menandingi kinerja refraktori referensi magnesia-krom. Oleh karena itu, refraktori magnesium-krom masih digunakan dalam skala besar karena kinerja erosi-korosinya yang luar biasa. Lapisan tahan api harus diganti setial beberapa bulan karena tekanan kimia, termal, dan mekanis. Banyak ahli berasumsi bahwa 70% keausan refraktori disebabkan oleh korosi kimia. Korosi kimia tidak terbatas pada antarmuka lapisan bak yang dipengaruhi oleh gaya kapiler, namun juga dapat terjadi jauh di dalam pori-pori batu bata tahan api.

Pemisahan gravitasi dan flotasi merupakan teknologi ekonomis yang banyak diterapkan untuk pemulihan logam di bidang pemrosesan mineral. Dalam studi yang telah dilakukan untuk proses gabungan pemisahan gravitasi dan flotasi menunjukkan bahwa proses ini dapat secara efektif mendaur ulang logam yang terkandung dalam refraktori bekas, sedangkan refraktori dengan sedikit pengotor pat digunakan sebagai bahan mentah untuk refraktori terbaharukan.



nologi ini tidak menggunakan activator, inhibitor dan bahan pengatur sehingga air limbah yang dihasilkan dalam produksi industri dapat

dikembalikan ke produksi setelah diendapkan. Dengan demikian, seluruh proses tidak menghasilkan air limbah. Selain itu, teknologi ini menawarkan banyak keunggulan, seperti biaya rendah dan pengoperasian yang sederhana. Untuk menilai kelayakan teknologi yang diusulkan, analisis mineralogi rinci dari bahan tahan api bekas dilakukan., dan kemudian serangkaian uji pemisahan gravitasi dan percobaan flotasi dilakukan (Xue *et al.*, 2018).

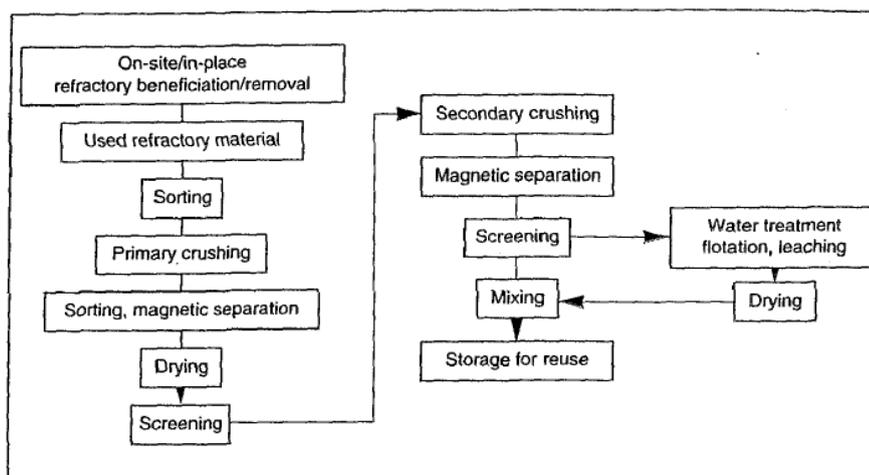
Daur ulang refraktori bekas lainnya

Contoh lain dari penelitian daur ulang refraktori bekas disebutkan dalam literatur. Biro Pertambangan AS (sekarang DOE) Pusat Penelitian Albany memiliki menyelesaikan karakterisasi beberapa batu bata 70% Al_2O_3 dari berbagai zona tungku gema putar yang digunakan untuk produksi kuningan dan perunggu sekunder. Karena kontaminasi Pb, disimpulkan bahwa pemanfaatannya akan sulit karena sekitar setengah dari refraktori yang digunakan akan membutuhkan detoksifikasi timbal sebelum didaur ulang. Batu bata dasar berikatan tar (96% MgO) yang diperoleh dari tungku oksigen dasar telah digunakan dalam campuran serudukan untuk lapisan kerja BOF. Refraktori dolomit bekas telah terbukti sulit didaur ulang karena hidrasi yang cepat. Namun, batu bata dolomit bekas didaur ulang menjadi bata tahan api dan campuran monolitik di Jerman dan penggunaan non-refraktori seperti terak atau kondisioner tanah juga telah dilaporkan. Ada beberapa contoh penggunaan kembali yang disebutkan dalam literatur. Refraktori bekas yang kaya alumina yang dihancurkan telah digunakan sebagai pengganti bauksit dalam tanur sembur besi dan refraktori bekas magnesita yang dihancurkan telah digunakan sebagai bahan baku kondisioner terak baja. Sebagian kecil bahan refraktori bekas telah digunakan tanpa efek yang merugikan dalam insutri ubin keramik, batu bata, dan bahan bangunan dekoratif. Refraktori silikat yang dihancurkan, disaring, dan diuntungkan juga telah digunakan sebagai pengganti pasir dalam pembuatan semen Portland (Fang *et al.*,1999).

Penggunaan produk daur ulang untuk refraktori biasanya bukan pilihan yang layak karena biaya pengiriman dan pemrosesan yang tinggi serta perubahan material. Pada tahun 1990, kurang dari 45.000 ton refraktori didaur ulang lusen logam, yang mewakili kurang dari 2 persen dari total produksi (Fang *et al.*,1997).



Salah satu tantangan yang dihadapi pendaur ulang refraktori adalah bahwa setiap produk harus menjalani pemrosesan yang berbeda, beberapa lebih kompleks dan mahal daripada yang lain. Untuk mendaur ulang batu bata Mag-Chrome, produk dipisahkan menjadi dua produk setelah tahap penghancuran dan penggilingan. Produk pertama adalah kromit yang mengandung besi tinggi (dan dengan demikian bersifat magnetik), yang dipisahkan oleh garis pemisahan magnetik. Bahan yang tersisa kaya akan MgO dan kemudian digunakan sebagai pengganti pasir dalam beton. Kedua aliran tersebut dicuci untuk menghilangkan kotoran. Kromit yang terpisah didaur ulang untuk digunakan dalam Mag-Chrome batu bata.



Gambar 12 Refractory recycling flow sheet (Donald et al., 1997).

Sangatlah mahal untuk mengangkut refraktori bekas dari pengguna ke pendaur ulang. Karena banyak refraktori bekas yang dapat didaur ulang merupakan barang bernilai rendah, seringkali lebih murah untuk membeli bahan baku baru daripada menggunakan bahan daur ulang. Selain itu, produk yang menggunakan bahan daur ulang mungkin memiliki kinerja yang meragukan atau tidak konsisten. Jika refraktori daur ulang tidak memiliki kinerja yang sebanding, aplikasi material yang tidak terlalu parah harus dipertimbangkan. Beberapa produsen dan pengguna refraktori mendaur ulang bahan mereka sendiri. Produk yang tidak terpakai dan / atau rusak biasanya didaur ulang sebagai bahan baku oleh produsen. Refraktori lainnya dapat menggunakan beberapa bahan refraktori bekas di pabrik mereka.



Beberapa produsen refraktori bertanggung jawab untuk membuang atau mendaur ulang lapisan refraktori krom bekas, dan kemudian hanya yang mereka produksi. Mereka menerima tanggung jawab ini, karena mereka menganggap pembuangan lapisan bekas sebagai keuntungan pemasaran atau karena mereka diminta oleh pengguna untuk memiliki lapisan saat dilepas. Refraktori yang mengandung krom yang bersifat karsinogenik dapat dinetralisir dengan pengolahan padat-cair, direduksi menjadi ferroalloys, dilebur menjadi bahan abrasif, didaur ulang sebagai refraktori, atau digunakan dengan cara lain. Beberapa perusahaan pembuangan limbah berbahaya dapat mengolah limbah refraktori yang mengandung krom untuk ditimbun atau didaur ulang.

Refraktori yang mengandung krom digunakan dalam pembuatan kaca (tungku tekstil dan fiberglass dan area tenggorokan tangki kaca); portland tanur putar semen; baja dan generator pemanas ulang kaca; khusus dekarbonisasi argon-oksigen baja tungku; tungku pembuatan baja dan sendok transfer; tembaga, nikel, dan peleburan timbal; ketel uap utilitas; tungku gasifikasi batubara; dan insinerator limbah.

EPA mengharapkan pembuangan refraktori krom berbahaya dilakukan dengan pengolahan dan atau daur ulang. Pembuangan refraktori yang mengandung krom merupakan masalah pembuangan refraktori terbesar dan paling serius yang pernah ada. Banyak produsen telah berhenti menggunakan refraktori yang mengandung krom daripada mengatasi masalah pembuangan krom heksavalen.

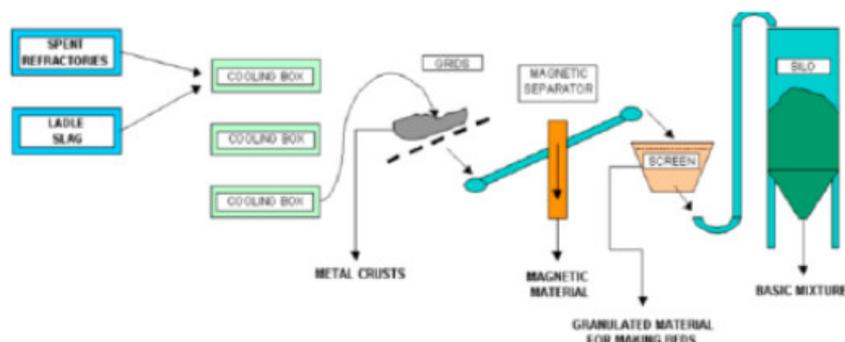
Solusi untuk masalah pembuangan bata tahan api bekas harus mencakup produsen, pengguna, pendaur ulang, dan pengolah limbah berbahaya. masalah berikut harus ditangani: variasi dan jumlah komposisi refraktori; aplikasi bahan tahan api; siklus hidup tungku; peraturan yang dapat diterapkan; dan sarana untuk mengumpulkan dan menyortir bahan bekas dari seluruh negeri.

2.1.8 Tinjauan Tentang Daur Ulang Refraktori untuk Industri Besi dan Baja

Industri baja sebagian besar mengkonsumsi refraktori magnesit, dolomit, dan silico- aluminous. Ada berbagai macam jenis, cara pembuatan, bejana atau alat yang harus dilapisi, dan cakupan praktik pengoperasian yang luas. Semua alat daur ulang menjadi masalah yang kompleks. Selama penggunaan, material dilarutkan dalam terak, logam panas, dan baja. Setelah



digunakan, sisa-sisa tersebut dapat didaur ulang secara internal atau eksternal, atau dapat disimpan. Daur ulang internal dapat berarti penggunaan limbah refraktori di dalam pabrik baja. Misalnya, sebagai kondisioner terak di tanur sembur, BOF atau EAF. Daur ulang eksternal berarti limbah refraktori dikirim kembali ke pabrik refraktori atau ke pendaur ulang khusus. Penimbunan mengacu pada material yang dikirim untuk disimpan secara langsung oleh industri baja. Dua pabrik di Italia yang dilengkapi dengan peralatan untuk mendaur ulang refraktori adalah Ferriere Nord dan Stefana. Keduanya merupakan pabrik peleburan elektrik yang memproduksi baja untuk tulangan dan batang kawat. Dalam kedua kasus tersebut, refraktori bekas didaur ulang bersama dengan ladle slag (Gambar 13). Refraktori berasal dari lapisan sendok dolomit, lapisan tundish, dan perapian EAF. Batu bata EAF didaur ulang dalam industri refraktori. Baik di Ferriere Nord maupun Stefana terdapat injektor khusus untuk memasukkan campuran ladle slag/refraktori ke dalam EAF.



Gambar 13 Tata letak peralatan untuk daur ulang baja dan terak di EAF di Ferriere Nord (Donald *et al.*, 1997).

Untuk mengimplementasikan program daur ulang, penilaian terhadap jenis dan jumlah refraktori yang masuk ke pabrik harus dilakukan, termasuk area di mana refraktori tersebut digunakan, praktik pembuangan saat ini, dan biaya yang sesuai. Opsi untuk penggunaan kembali atau pembuangan harus dipertimbangkan, serta perubahan proses yang dapat mengurangi limbah material. Penilaian ini harus dilakukan dengan mengikuti prioritas berikut: 1) pengurangan konsumsi; 2) daur ulang internal; 3) penggunaan ulang eksternal; 4) pengolahan; 5) pembuangan.



2.2. *Life Cycle Assessment (LCA)*

Penilaian siklus hidup adalah teknik evaluasi kuantitatif ilmiah untuk menilai dampak lingkungan dan konsumsi sumber daya untuk menghasilkan suatu produk atau untuk suatu proses mulai dari ekstraksi bahan baku, pengolahan hingga pembuangan akhir, yang merupakan keseluruhan siklus hidup (*cradle to grave*). LCA dapat digunakan sebagai alat teknis untuk mengevaluasi konsekuensi lingkungan dari suatu produk, proses produksi, pengemasan atau aktivitas apapun di seluruh siklus hidup produk atau jasa (Bhakar *et al.*, 2013). Kegiatan industri pasti akan berdampak pada perubahan lingkungan seperti kualitas air, tanah, dan udara. Pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)* merupakan alat yang tepat untuk menilai beban lingkungan berdasarkan analisis inventarisasi konsumsi sumber daya, bahan bakar, energi, air serta faktor yang lain sehingga beban lingkungan dapat dilihat, dan kemudian dapat dilakukan analisis dengan menggunakan berbagai alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan tersebut. Analisis *Life Cycle Assessment (LCA)* dapat digunakan sebagai pilihan untuk mengurangi limbah dan mengelola sisa proses produksi di pabrik. Jumlah sampah yang dihasilkan dan cara pengolahannya akan berdampak signifikan terhadap produktivitas industri. Dampak terhadap lingkungan yang dihasilkan dalam kegiatan industri tentunya akan berdampak baik secara langsung maupun tidak langsung terhadap lingkungan. Saat ini, *Life Cycle Assessment (LCA)* adalah salah satu metode paling populer untuk mengevaluasi dampak lingkungan. Karena *Life Cycle Assessment (LCA)* adalah metode penilaian yang sederhana dan menyeluruh yang telah mendapat pengakuan internasional dan banyak digunakan oleh para pecinta lingkungan (Abdilah dan Atikha, 2022).

2.2.1 Langkah-Langkah *Life Cycle Assessment (LCA)*

Setiap Langkah LCA dijelaskan dalam standard internasional (ISO 14,401, ISO 14041) (Harjanto *et al.*, 2012). Menurut ISO (2006), terdapat empat fase dari studi LCA, yaitu:



1) Tujuan dan ruang lingkup

Fase ini bertujuan untuk memformulasikan dan mendeskripsikan tujuan, sistem yang akan dievaluasi, Batasan-batasan, dan asumsi-asumsi yang berhubungan dengan dampak di sepanjang siklus hidup dari sistem

yang sedang dievaluasi (Gaol, 2017). Di tahap ini, *functional unit* (fu) ditentukan sebagai parameter *input* dan *output* dari inventarisasi data yang memungkinkan perbandingan antar sistem yang dianalisis (ISO, 2006). Ada empat pilihan utama untuk menentukan batas-batas sistem yang digunakan berdasarkan ISO 14044 didalam sebuah studi LCA:

- ***Cradle to grave***

Cradle to grave merupakan penilaian siklus hidup secara keseluruhan mulai dari pengambilan *raw material* dari bumi untuk membuat produk dan berakhir pada titik dimana seluruh material kembali ke bumi.

- ***Gate to grave***

Mencakup keseluruhan daur hidup produk, yaitu: proses, pengekstrakan, pemrosesan bahan mentah, pemanufakturan, transportasi dan distribusi, penggunaan atau penggunaan ulang, pemeliharaan, daur ulang, dan pembuangan akhir.

- ***Cradle to gate***

Cradle to gate merupakan penilaian dari sebagian siklus hidup produk mulai dari ekstraksi sumber daya sampai produk didistribusikan ke konsumen. Pada ruang lingkup ini, fase kegunaan (*use*) dan pembuangan (*disposal*) dari produk dihilangkan.

- ***Gate to gate***

Gate to gate merupakan ruang lingkup yang terpendek karena hanya menilai pada proses yang memiliki nilai tambah dalam aliran produksi (Mutiara, 2018).

2) LCI (*Life Cycle Inventory*)

LCI mencakup pengumpulan data dan perhitungan *input* dan *output* ke lingkungan dari sistem yang sedang dievaluasi. Fungsinya adalah menginventarisasi penggunaan sumber daya, penggunaan energi dan pelepasan ke lingkungan terkait dengan sistem yang sedang dievaluasi. Proses LCI membutuhkan data-data penting yang dijadikan dasar dalam proses uratan data, sehingga data yang dikumpulkan harus lengkap dan berasal sumber yang tepat (Gaol, 2017).



3) LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*)

Dampak lingkungan potensial yang signifikan dari proses/produk berdasarkan LCI dievaluasi menggunakan *impact assessment*. Fase ini bertujuan untuk mengelompokkan dan menilai dampak lingkungan yang signifikan. Beberapa tahapan dalam penentuan nilai dampak lingkungan yang dihasilkan ke dalam bentuk angka, beberapa tahapan dilakukan adalah klasifikasi dan karakterisasi, normalisasi, pembobotan dan *single score* (Gaol, 2017).

4) Interpretasi

Tahapan terakhir dari metode LCA adalah interpretasi data. Hasil dari ketiga tahapan sebelumnya, kemudian diambil kesimpulan akhir. Kombinasi hasil-hasil dari *life-cycle inventory* dan *life-cycle impact assessment* digunakan untuk menginterpretasikan, menarik kesimpulan dan rekomendasi yang konsisten dengan *goal* dan *scope* yang telah diidentifikasi sebelumnya (Gaol, 2017).

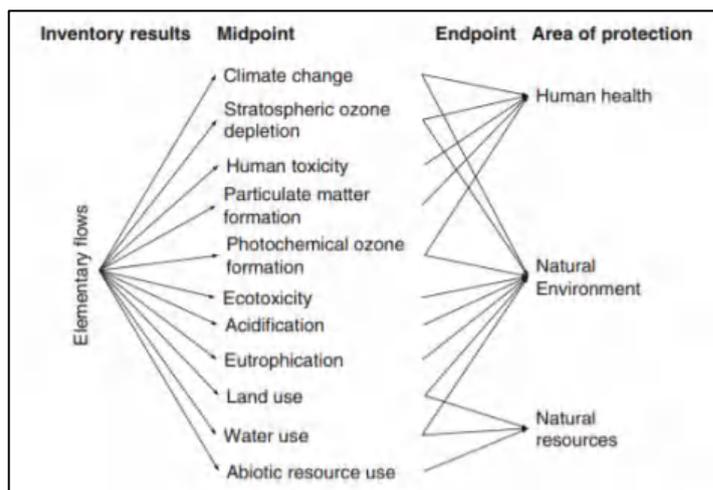
2.2.2 Metode Penilaian Dampak Daur Hidup

Pada tahap penilaian dampak terdapat berbagai proses yang kompleks dikarenakan banyaknya data hasil inventarisasi dan rumitnya pengolahan data melalui serangkaian proses tahapan penilaian daur hidup. Dasarannya tersebut dijadikan sebagai sebuah pengembangan berbagai metode penilaian dampak untuk mempermudah pelaksanaannya. Metode penilaian dampak dikembangkan untuk menghubungkan hasil inventarisasi data dengan dampak lingkungan yang relevan, dimana hasilnya akan diklasifikasikan dalam berbagai kategori dampak dengan besaran tertentu. Menurut Menoufi (2011), dalam menentukan besar dampak lingkungan pada tahap karakterisasi, terdapat dua pendekatan pada faktor karakterisasi yang dapat digunakan yaitu pendekatan titik tengah (*midpoint approach*) dan pendekatan titik akhir (*endpoint approach*).

Pendekatan titik tengah lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal, seperti *climate change*, *ozone depletion*, asidifikasi, dan lain-lain. Nilai akhir dari dampak yang ditimbulkan hanya menggambarkan sebab-akibat dampak awal yang akan muncul dari data yang dimasukkan pada tahap *life inventory* (LCI). Perbedaan antara metode *midpoint* dan *endpoint* yaitu



dampak lingkungan yang dihasilkan pada pendekatan titik akhir (*endpoint*) berada pada tingkat pengkategorian yang lebih tinggi dan besar, seperti *human health*, *ecosystem quality*, dan *natural resources*. Perbedaan lebih lengkap terkait pendekatan *midpoint* dan *endpoint* dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14 Penilaian Dampak *Midpoint* vs *Endpoint* (Hauschild et al., 2013)

2.2.3 Metode CML-IA

Pada tahun 2001, sekelompok ilmuwan di bawah pimpinan CML (Pusat Ilmu Lingkungan Universitas Leiden) mengusulkan serangkaian kategori dampak dan metode karakterisasi untuk langkah penilaian dampak. Metode penilaian dampak diimplementasikan sebagai metodologi CML-IA didefinisikan untuk pendekatan titik tengah. Normalisasi disediakan tetapi tidak ada pembobotan atau penambahan. Ada dua versi metode ini yang tersedia di SimaPro 8: versi “*baseline*” dengan 10 kategori dampak; dan versi yang diperluas dengan “semua kategori dampak” (Rosyid, 2022). Pada Tabel 5 di bawah ini merupakan *overview* kategori dampak yang terdapat pada metode CML IA-Baseline.



Tabel 5 Kategori Dampak Metode CML-IA

Kategori Dampak	Satuan
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	MJ
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq
<i>Global warming (GWP100a)</i>	kg CO ₂ eq
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq
<i>Abiotic depletion</i>	kg Sb eq
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ³⁻ eq
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB eq
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB eq
<i>Fresh water aquatic ecotox.</i>	kg 1,4-DB eq
<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	kg CFC-11 eq

(SimaPro)

2.2.4 Metode Cumulative Energy Demand (CED)

Cumulative Energy Demand merupakan suatu metode yang mengukur penggunaan energi primer sepanjang daur hidup suatu produk. Metode ini mencakup penggunaan energi secara langsung maupun tidak langsung (Acero *et al.*, 2015). Penggunaan energi langsung yaitu kondisi dimana jumlah energi yang digunakan sama dengan jumlah energi masuk. Penggunaan energi tidak langsung yaitu jumlah energi yang digunakan merupakan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi total. Pendekatan pada metode ini menerapkan konsep jenis energi yang digunakan yang meliputi energi tidak terbarukan seperti fosil energi terbarukan seperti panas bumi (Frischknecht *et al.*, 2015).



Tabel 6 Kategori Dampak Metode *Cumulative Energy Demand*

<i>Impact category group</i>	<i>Name of the impact category in the method</i>	<i>Reference unit</i>
<i>Non-renewable resources</i>	<i>Fossil</i>	MJ
	<i>Nuclear</i>	MJ
	<i>Primary forest</i>	MJ
<i>Renewable resources</i>	<i>Biomass</i>	MJ
	<i>Geothermal</i>	MJ
	<i>Solar</i>	MJ
	<i>Wind</i>	MJ
	<i>Water</i>	MJ

(Acero *et al.*, 2016)

2.2.5 Metode IMPACT World+

IMPACT World+ merupakan pembaruan dan kompilasi metode IMPACT 2002+, LUCAS, dan EDIP. Metode ini memiliki cakupan global dan tersedia sebagai titik tengah dan titik akhir (tingkat kerusakan). Sebagian besar kategori dampak regional diselesaikan secara spasial dan semua kategori dampak jangka panjang dibagi lagi menjadi kerusakan jangka pendek (selama 100 tahun setelah emisi) dan kerusakan jangka panjang.

Implementasi di SimaPro didasarkan pada versi 1.29 (titik tengah) dan 1.47 (titik akhir) mencakup:

1. Hanya indikator yang direkomendasikan (bukan sementara),
2. Regionalisasi parsial- aliran regionalisasi apapun, yang merupakan hal baru bagi SimaPro, tidak disertakan dalam implementasi ini. hal ini karena bahan-bahan tersebut tidak digunakan dalam inventarisasi dan akan memberikan kesan yang salah mengenai kontribusi terhadap hasil.

Kerusakan pada area yang dilindungi (kesehatan manusia dan kualitas ekosistem), bukan pada area yang dikhawatirkan (air dan karbon) ((Pre Sustainability, 2023).



2.2.6 Kategori Dampak

Kategori dampak merupakan spesifik jenis dampak yang ada di dalam sebuah metode penilaian dampak. Metode penilaian dampak yang satu dengan lainnya mempunyai kemungkinan berbeda, baik secara kategori dampaknya maupun satuan dampaknya. Metode penilaian dampak juga tidak menutup kemungkinan antara satu metode penilaian dampak dengan yang lainnya memiliki kesamaan kategori dampak, namun dapat berbeda faktor karakterisasi dan normalisasinya (Rosyid, 2022).

a. *Depletion of abiotic resources*

Kategori dampak ini berkaitan dengan perlindungan kesejahteraan manusia, kesehatan manusia, dan kesehatan ekosistem. Indikator dampak ini terkait dengan ekstraksi mineral dan bahan bakar fosil karena adanya input dalam sistem. Faktor penipisan abiotik (abiotic depletion factor/AFD) ditentukan untuk setiap ekstraksi mineral dan bahan bakar fosil (kg antimony ekuivalen/kg ekstraksi) berdasarkan cadangan konsentrasi dan laju de-akumulasi.

b. *Climate change*

Perubahan iklim dapat mengakibatkan dampak yang merugikan bagi kesehatan ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim terkait dengan emisi gas kaca ke udara. Model karakterisasi yang dikembangkan oleh Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dipilih untuk pengembangan faktor karakterisasi. Faktor-faktor tersebut dinyatakan sebagai Potensi Pemanasan Global untuk jangka waktu 100 tahun (GWP100), dalam kg karbon dioksida/kg emisi.

c. *Stratospheric Ozone depletion*

Karena penipisan ozon stratosfer, sebagian besar radiasi UV-B mencapai permukaan bumi. Hal ini dapat menimbulkan dampak yang berbahaya bagi kesehatan manusia, kesehatan hewan, ekosistem darat dan air, siklus biokimia, dan material. Model karakterisasi dikembangkan oleh Organisasi Meteorologi Dunia



(WMO) dan mendefinisikan potensi penipisan ozon dari berbagai jenis gas (kg setara CFC-11/kg emisi). Rentang waktunya tidak terbatas.

d. *Human Toxicity*

Kategori ini berkaitan dengan efek zat beracun pada lingkungan manusia. Risiko kesehatan akibat paparan di lingkungan kerja tidak termasuk di dalamnya. Untuk setiap zat beracun, HTP dinyatakan sebagai ekuivalen 1,4-diklorobenzena/kg emisi.

e. *Freshwater aquatic ecotoxicity*

Indikator kategori ini mengacu pada dampak terhadap ekosistem air tawar, sebagai akibat dari emisi zat beracun ke udara, air, dan tanah yang menghasilkan potensi ekotoksitas perairan air tawar. Jangka waktunya tidak terbatas. Faktor karakterisasi dinyatakan sebagai 1,4-diklorobenzena ekuivalen/kg emisi.

f. *Marine ecotoxicity*

Toksisitas lingkungan laut mengacu pada dampak zat beracun terhadap ekosistem laut.

g. *Terrestrial ecotoxicity*

Kategori ini mengacu pada dampak zat beracun terhadap ekosistem darat.

h. *Photo-oxidant formation*

Pembentukan foto-oksidan adalah pembentukan zat reaktif (terutama ozon) yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan ekosistem serta dapat merusak tanaman. Masalah ini juga diindikasikan dengan “kabut asap musim panas”. Potensi penciptaan ozon fotokimia (POPC) untuk emisi zat ke udara dihitung dengan model lintasan UNECE (termasuk nasib), dan dinyatakan dalam kg etilen ekuivalen/kg emisi. Rentang waktunya adalah 5 hari.

i. *Acidification*

Zat pengasaman menyebabkan berbagai dampak pada tanah, air tanah, air permukaan, organisme, ekosistem, dan material



(bangunan). Potensi pengasaman (AP) untuk emisi ke udara dihitung dengan model RAINS 10 yang telah diadaptasi, yang menggambarkan nasib dan pengendapan zat pengasaman. AP dinyatakan sebagai kg SO₂ ekuivalen/kg emisi. Rentang waktu yang digunakan adalah sepanjang masa.

j. Eutrophication

Eutrofikasi (juga dikenal sebagai nutrifikasi) mencakup semua dampak yang disebabkan oleh tingkat unsur hara makro yang berlebihan di lingkungan yang disebabkan oleh emisi unsur hara ke udara, air, dan tanah. Potensi nutrisi (NP) didasarkan pada prosedur stoikiometri dan dinyatakan sebagai kg PO₄ ekuivalen per kg emisi (Pre Sustainability, 2023).

2.3 Pemilihan Software untuk Analisa LCA

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan Analisa LCA menggunakan software menjadi semakin penting. Terdapat banyak software yang dapat mewadahi kegiatan analisa tersebut. Kualitas software yang baik dapat dilihat berdasarkan struktur, *display of process*, transparansi, *database*, metode kalkulasi, serta metodologinya. Berikut adalah contoh beberapa software untuk menganalisa LCA.

Tabel 7 Software Analisa LCA

<i>Database name</i>	<i>Supplier</i>	<i>Free demo/trial available</i>	<i>Languages</i>	<i>Special area, if any</i>
<i>DEAMTM</i>	<i>Ecobilan-Pricewaterh puseCoopers</i>	<i>No</i>	<i>English</i>	
<i>EcoInvent data v1.3</i>	<i>EcoInvent Centre</i>	<i>Yes</i>	<i>Japanese, English</i>	
<i>1E 1.0</i>	<i>CODDE</i>	<i>Yes</i>	<i>Spanish, French, English</i>	<i>Selection of products</i>



<i>Esu-services database v1</i>	<i>ESU-services Ltd.</i>	<i>No</i>	<i>German, English</i>	
<i>GaBi Databases 2006</i>	<i>PE International GmbH</i>	<i>No</i>	<i>Japanese, German, English</i>	
<i>Option data pack</i>	<i>National Institute of Advance Industrial Science and Technology (AIST)</i>	<i>No</i>	<i>Japanese</i>	<i>Chemical production, iron & steel and waste management processes</i>
<i>Sabento library 1.1</i>	<i>Ifu Hamburg GmbH</i>	<i>No</i>	<i>German, English</i>	<i>Enzymatic processes, cell cultures, and microbiological system</i>
<i>SALCA 071</i>	<i>Agroscope Reckenholz-Tanikon Research Station ART</i>	<i>No (free to developers)</i>	<i>German, English</i>	<i>Agriculture</i>
<i>SimaPro database</i>	<i>PreConsultants B.V.</i>	<i>Yes</i>	<i>English</i>	
<i>sirAdos 1.2.</i>	<i>LEGEP Software GmbH</i>	<i>No</i>	<i>German</i>	<i>Construction</i>
<i>The Boustead Model 5.0.12</i>	<i>Boustead Consulting Limited</i>	<i>No</i>	<i>English</i>	<i>Fuels, materials</i>
<i>Umberto library 5.5</i>	<i>Ifu Hamburg GmbH</i>	<i>Yes</i>	<i>German, English</i>	

(Lehtinen, 2011)



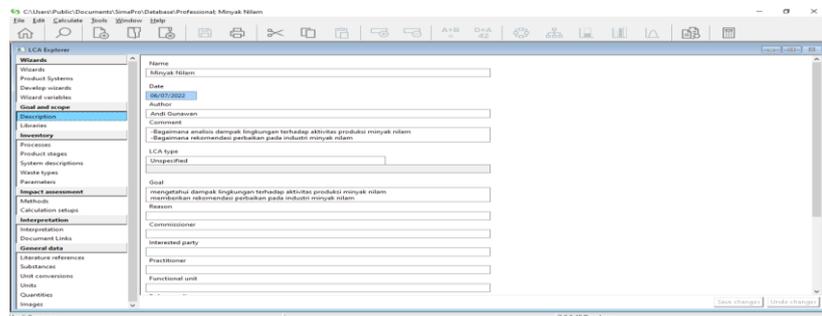
penggunaan *Software SimaPro 9.0*

Menurut Gunawan (2023) tahapan penggunaan *software SimaPro* secara sebagai berikut:

1. Penentuan *Goal and Scope Definition*

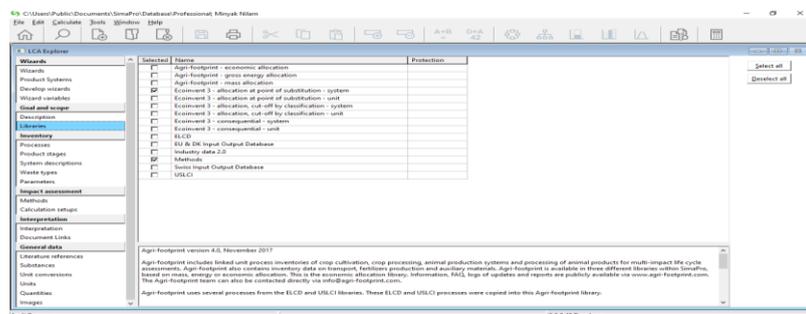
Terdapat beberapa cara untuk melakukan penentuan dan ruang lingkup pada software sebagai berikut:

- Description*, pada menu ini adalah tempat untuk melakukan input data seperti data penulis, komentar, alasan dan tujuan mengapa melakukan penelitian LCA. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Tampilan Menu *Description*

- Libraries*, pada menu ini merupakan tempat untuk memilih metode untuk menganalisis dampak sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Tampilan Menu *Libraries*

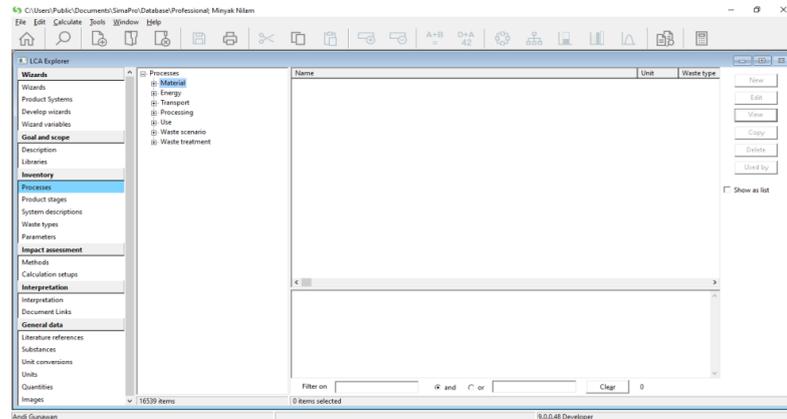
2. Penentuan *Life Cycle Inventory (LCI)*

Tahap ini akan dilakukan penguraian semua bahan material yang digunakan serta emisi yang dapat ditimbulkan:

- Process*, untuk menunjukkan semua proses produksi produk terkait yang membutuhkan input data. Tampilan layar pada

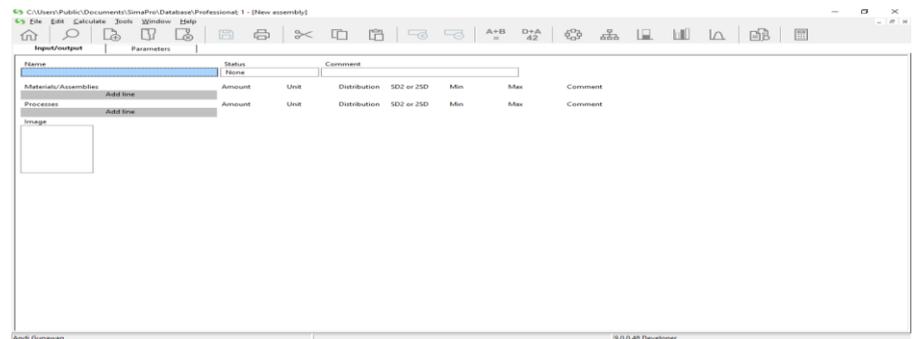


tahap ini dapat dilihat pada Gambar 17.



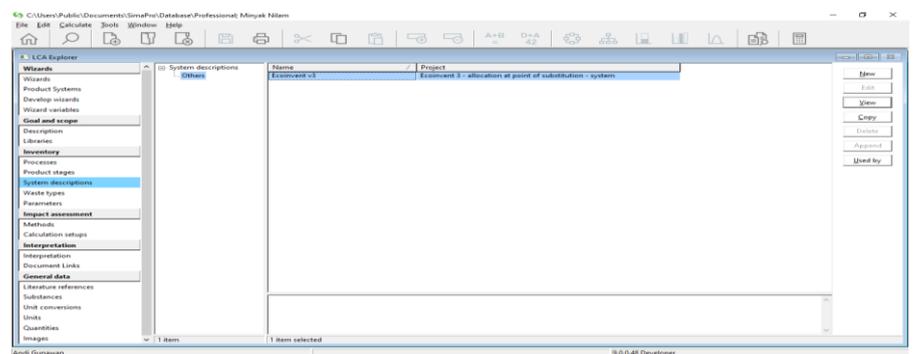
Gambar 17 Tampilan Menu *Process*

- b. *Product stage*, untuk mendeskripsikan suatu produk yang diproduksi, dipakai, dan dibuang. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Tampilan Menu *Product Stages*

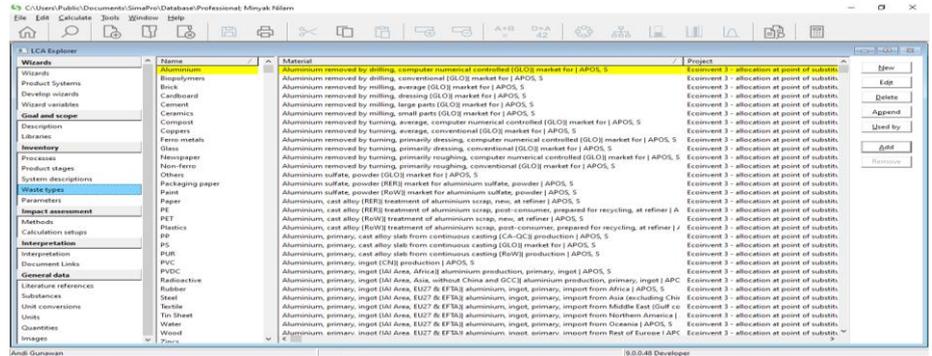
- c. *System description*, merupakan catatan untuk mendeskripsikan struktur sistem. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19 Tampilan Menu *System Description*



- d. *Waste types*, untuk mendefinisikan material yang akan dibuang atau digunakan kembali. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 20.

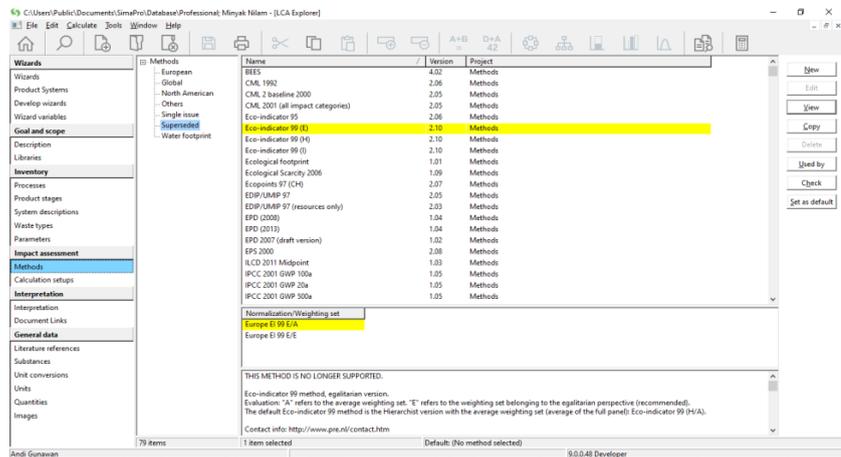


Gambar 20 Tampilan Menu *Waste Types*

3. Penentuan *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

Pada tahap ini akan didapatkan hasil analisis penilaian cemaran yang terdiri dari *characterization*, *normalization*, *weighting*, dan *single score*. Terdapat beberapa cara pada tahapan ini, yaitu:

- a. *Methods*, merupakan cara untuk memilih detail metode yang akan digunakan dalam penilaian cemaran. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 21.

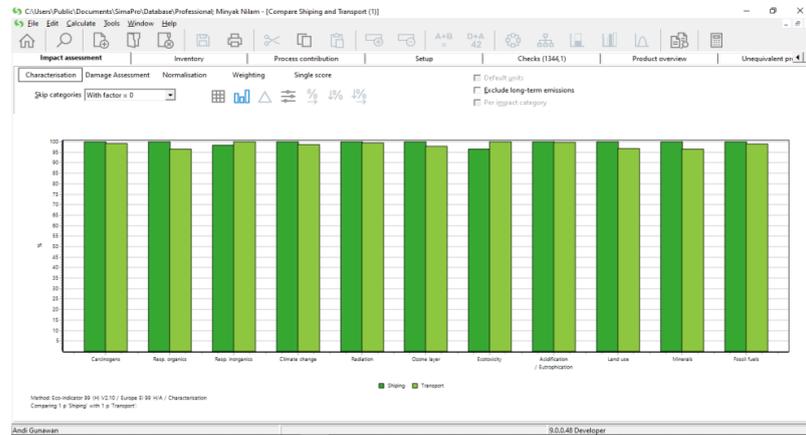


Gambar 21 Tampilan Menu *Methods*

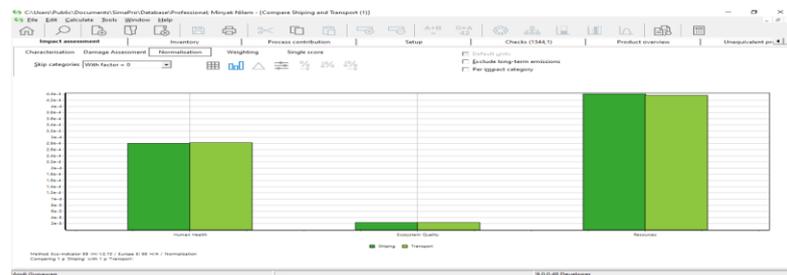
- b. *Calculation setups*, adalah tahapan untuk melakukan kalkulasi untuk mendapatkan nilai dan grafik dari cemaran yang dianalisis yang terdiri dari *characterization*, *normalization*, *weighting*, dan



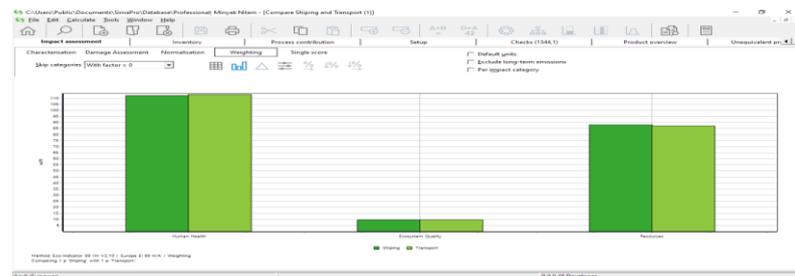
single score. Tampilan layar pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 22, Gambar 23, Gambar 24 dan Gambar 25.



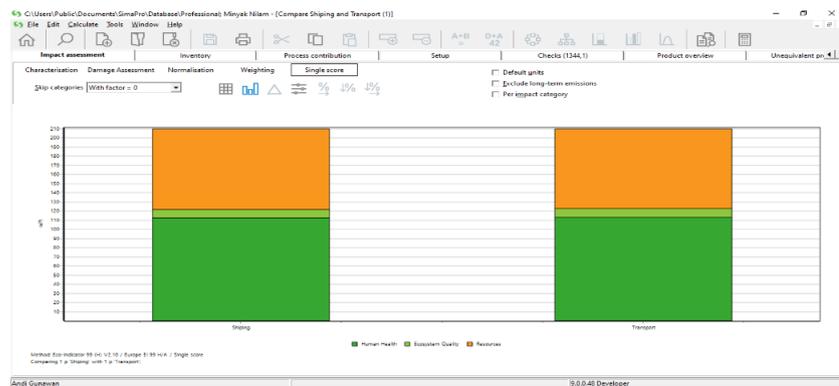
Gambar 22 Tampilan Grafik *Characterization*



Gambar 23 Tampilan Grafik *Normalization*



Gambar 24 Tampilan Grafik *Weighting*



Gambar 25 Tampilan Grafik *Single Score*



Keunggulan lainnya yang diperoleh dari SimaPro adalah sebagai berikut:

- Mampu memodelkan dan menganalisis siklus hidup produk yang kompleks dengan cara yang sistematis dan transparan.
- Mampu mengukur dampak lingkungan dari produk dan layanan di seluruh tahap siklus hidup produk.
- Mampu mengidentifikasi informasi-informasi penting yang saling bertautan dalam rantai pasok, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga akhir umur produk.
- Dilengkapi dengan beragam database inventori yang *up to date*, diantaranya: *Agri-footprint*, *Ecoinvent database*, *U.S. Life Cycle Inventory database*, *Swiss Input/Output database*, *Industry data library: Plastics Europe*, *ERASM*, *Worldsteel*.
- Memiliki berbagai metode analisis LCA pendukung, diantaranya: *Impact 2002+*, *TRACI 2.1*, *RECiPe 2016*, *Ecosystem Damage Potential*, *Greenhouse Gas Protocol*, dan *Cummulative Energy Demand* (Kelvin, 2021).

Kelemahan dari software SimaPro adalah sebagai berikut :

- Biaya investasi yang tinggi dan jumlah format dari kumpulan data yang terbatas (Annisa, 2022).

2.4 Pengolahan Limbah dengan 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*)

Dalam pengelolaan limbah hal pertama yang dilakukan adalah mengurangi limbah tersebut (*reduce*) dan memisahkan potensi daur ulang dari sumbernya untuk meningkatkan kualitas material supaya dapat digunakan kembali (*reuse*). Limbah yang tidak dapat dikurangi harus digunakan kembali jika memungkinkan (*recycle*). Prinsip 3R dapat membantu dalam menciptakan kehidupan yang berkelanjutan. Pola pikir terkait dampak konsumsi dan produksi limbah dapat membantu mendorong pembuatan keputusan untuk mengurangi sampah dan mengurangi dampaknya terhadap lingkungan. *Reduce, reuse dan recycle* membantu menyelamatkan sumber

alam untuk masa depan (Sukarlina dan Iphov, 2022).

Adanya program pengurangan sampah bermakna agar seluruh lapisan masyarakat, baik di tingkat lokal, dunia usaha maupun masyarakat luas melaksanakan pembatasan



timbulan sampah, pendauran ulang dan pemanfaatan kembali sampah atau yang lebih dikenal dengan konsep 3R. Pengertian pengelolaan sampah 3R secara umum adalah upaya untuk pengurangan pembuangan sampah, melalui kegiatan menggunakan kembali (*reuse*), dan mengurangi (*reduce*), dan mendaur ulang (*recycle*). Konsep tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. *Reuse* (menggunakan kembali), yaitu penggunaan kembali sampah secara langsung baik untuk fungsi yang sama maupun fungsi lain. Contoh yang dapat dilakukan di rumah tangga misalnya penggunaan kembali wadah bekas botol madu untuk wadah pernak-pernik, kaleng cat untuk tempat sampah, botol plastik untuk pot bunga dan sebagainya.
2. *Reduce* (mengurangi), yaitu mengurangi segala sesuatu yang menyebabkan timbulnya sampah. Hal ini dapat dilakukan misalnya dengan menggunakan kantong yang tahan lama untuk belanja kebutuhan sehari-hari, menggunakan produk yang bisa diisi ulang, mengurangi pemakaian bahan sekali pakai seperti tissue dengan serbet atau sapu tangan, membawa wadah makan atau minum sendiri dan lain-lain.
3. *Recycle* (Daur ulang) yaitu memanfaatkan kembali sampah setelah mengalami proses pengolahan. Hal yang dapat dikerjakan untuk konsep ini dalam skala rumah tangga diantaranya selalu memilih produk atau kemasan yang memiliki tanda bisa atau mudah didaur ulang, membuat kompos dari sampah organik yang dihasilkan, membuat sampah kaleng menjadi barang lain yang lebih bermanfaat.

Pengelolaan sampah dengan konsep 3R ini membutuhkan partisipasi masyarakat sebagai bagian yang sangat penting. Partisipasi masyarakat merupakan suatu keterlibatan untuk berperan secara aktif dalam suatu kegiatan yang bersih dan sehat, khususnya melakukan pengelolaan sampah (Trisnawati dan Khasanah, 2020).

2.5 Penelitian Terkait



Penelitian terkait dengan penilaian daur hidup refraktori brick yang akan dilakukan. Penelitian terdahulu dijadikan sebagai salah satu referensi dalam menentukan batasan penelitian yang akan dikaji.

Berikut ini penelitian terkait yang berhubungan dengan kajian LCA refraktori brick.

Tabel 8 Penelitian Terdahulu

Penulis, Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian
Munoz et al., 2020	<i>Life cycle assessment of refractory waste management in a Spanish Steel works</i>	<i>Monte carlo uncertainty analysis</i>	Hasil penelitian menunjukkan empat indicator yang dinilai, yaitu emisi gas rumah kaca, energi tak terbarukan, penggunaan energi tak terbarukan, penggunaan lahan dan penggunaan air. Secara keseluruhan, dengan basis limbah per ton, manajemen saat ini di pekerjaan baja yang dinilai menghasilkan pengurangan atau penghematan 0.54 ton CO ₂ -eq, penggunaan 3 GJ energi primer dari sumber yang tidak terbarukan, penggunaan 10 m ² lahan selama satu tahun dan abstraksi 5 m ³ air tawar. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan kembali, dalam kasus batu bata MgO-C bekas, menghasilkan manfaat yang lebih tinggi daripada daur ulang.
..., 2018	<i>Reducing energy consumption and carbon emission of magnesia refractory</i>	<i>Ecoinvent database v3.3 and carbon emissions accounting method.</i>	Melalui analisis skenario, peneliti menemukan bahwa penangkapan CO ₂ merupakan Langkah yang efektif untuk mengurangi emisi karbon dibandingkan dengan hanya



	<i>products: A life-cycle perspective</i>		meningkatkan konsumsi energi. Pada fase penggunaan, memperpanjang masa pakai akan mengurangi emisi karbon selama masa pakai produk, oleh karena itu pengguna harus berusaha memperpanjang masa pakai tungku secara keseluruhan.
Fang et al., 1999	<i>Study of spent refractory waste recycling from metal manufactures in Missouri</i>	Paper ini mengulas teknik yang diidentifikasi untuk mendaur ulang bahan tahan api, merangkum data dan informasi survei produsen logam di negara bagian.	Hasil dari survei menunjukkan bahwa dua aliran limbah besar ada di Missouri dan teridentifikasi bahwa dengan menerapkan daur ulang aliran limbah ini akan secara dramatis mengurangi kuantitas refraktori bekas yang dibuang ke tempat pembuangan akhir setiap tahunnya.
Guangwei et al., 2022	<i>Reusing waste red brick powder as partial mineral precursor in eco-friendly binders: Reaction kinetics, microstructure and life cycle assessment</i>	<i>Life cycles assessment (LCA) dan experimental pemanfaatan kembali limbah bubuk bata merah dalam bahan yang diaktivasi alkali.</i>	Dengan penggabungan WRBP, tingkat reaksi diperdalam, mendukung peningkatan matriks kekuatan. Hasil analisis difraksi sinar-X dan termogravimetri menunjukkan komposisi mineralogi yang konsisten produk reaksi dan peningkatan kuantitas gel. Karakteristik pori ditentukan oleh porosimetri intrusi merkuri menunjukkan bahwa pori-pori kapiler yang besar



disempurnakan dengan pengayaan gel dan efek pengisian WRBP.

Dari aspek ekonomi dan lingkungan, penggunaan kembali WRBP secara signifikan menghemat konsumsi energi dan mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂). Atas dasar kekuatan tekan yang optimal, energi indeks efisiensi konsumsi energi dan indeks intensitas CO₂ adalah 27,3 MJ / MPa dan 1,7 kg / MPa, yang dapat memberikan 38,55% penghematan konsumsi energi dan 44,90% penghematan jejak karbon.

Inamdar et al., 2022

Comparative life cycle assessment of recycled soil-stabilized bricks and traditional bricks

Life cycle assessment (LCA) menggunakan software SimaPro 9.3.0.

Penelitian ini mengevaluasi dampak lingkungan dari SSB dan batu bata konvensional. Klasifikasi dampak lingkungannya yaitu perubahan iklim, penipisan ozon, pengasaman dan eutrofikasi, toksisitas terhadap manusia dan pembentukan material partikulat. Penggabungan CWD dalam SSB menghasilkan pengurangan emisi CO₂ sebesar 54%. Produksi SSB akan mengarah pada penggunaan yang berkelanjutan dan penghematan sumber daya alam yang signifikan.



Wenshi et al., 2022	<i>Comparative life cycle assessment of cement, sintered bricks and non-sintered bricks manufacturing using water-based drilling cuttings from shale gas production in the Sichuan Basin, China</i>	<i>Life cycle assessment (LCA) dan menggunakan sensitivitas analisis.</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa urutan indeks dampak lingkungan untuk ketiga jalur daur ulang adalah semen, bata non-sinter, dan bata sinter. Emisi langsung, listrik, dan bahan pengikat merupakan contributor terbesar untuk persediaan semen, batu bata sinter, dan batu non-sinter, masing-masing menyumbang 54%, 33,4%, dan 62,1% dari beban dampak lingkungan masing-masing. Berdasarkan hasil LCA, strategi untuk mengurangi emisi dan konservasi energi yang diusulkan. Hasil ini memberikan referensi yang berguna untuk menciptakan sistem yang berkelanjutan untuk mendaur ulang limbah pengeboran berbasis air.
Danielle et al., 2016	<i>Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls</i>	<i>Life cycle assessment (LCA), menggunakan software SimaPro 7.3 dan metode IMPACT 2002+ (version Q2.2) dan ReCiPe.</i>	Dinding bata keramik memiliki dampak yang lebih kecil dibandingkan dengan bata beton dan dinding eksterior beton bertulang cor ditempat pada tiga indicator titik akhir yang berbeda (Perubahan iklim, Penipisan Sumber Daya dan Penarikan Air). Hasilnya tidak signifikan terkait dampak terhadap Kesehatan manusia dan kualitas ekosistem.
al., 2016	<i>Evaluation of</i>	<i>Metode</i>	Hasilnya menunjukkan bahwa



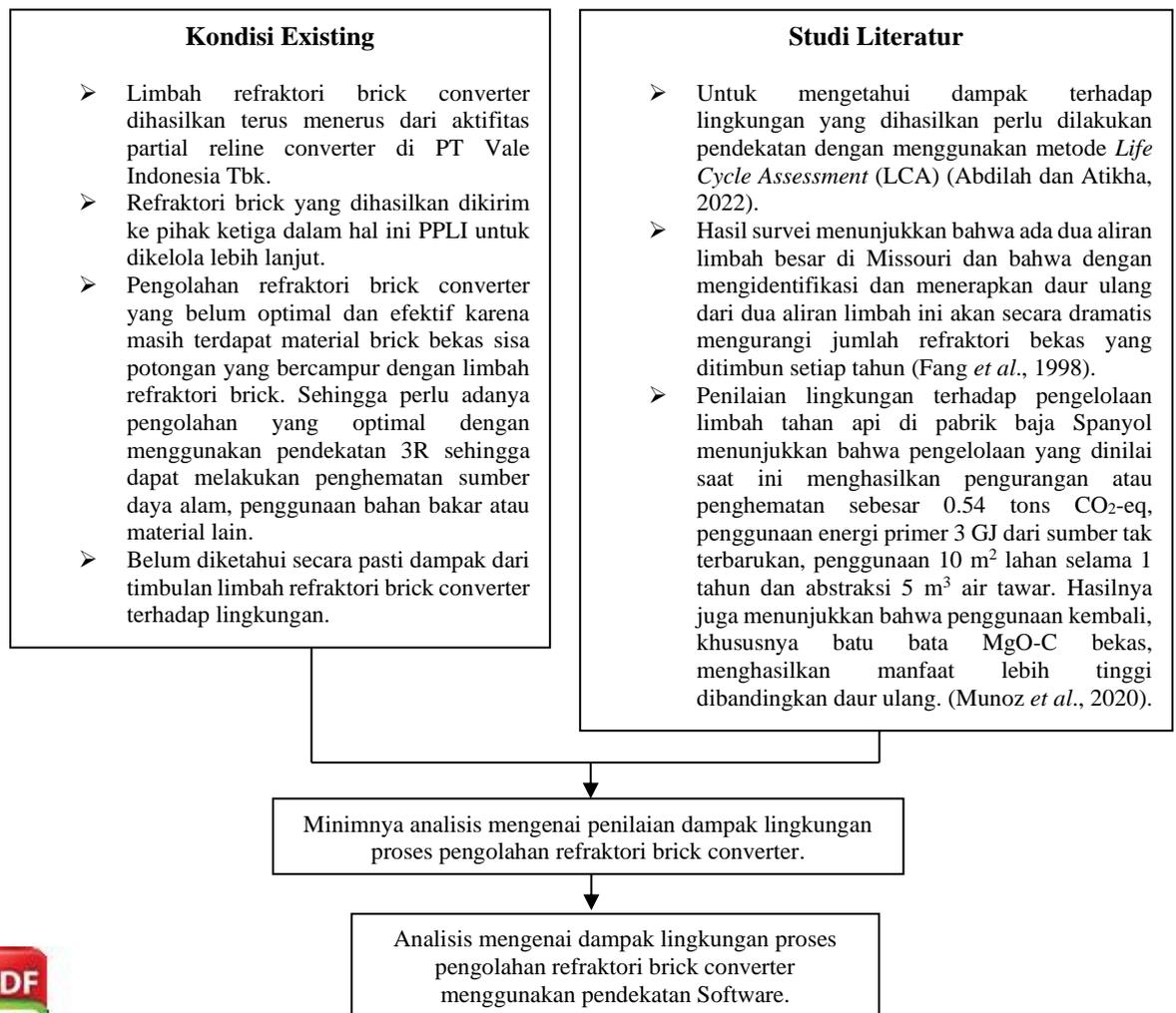
	<p><i>GHG emissions from the production of magnesia refractory raw materials in Dashiqiao, China</i></p>	<p>penelitian dalam area studi kasus dan perhitungan tentang cara mengukur emisi bahan baku tahan api magnesium yang berfokus pada emisi karbon dari produksi lima jenis bahan baku tahan api magnesium.</p>	<p>estimasi emisi gas rumah kaca adalah 2,7 t CO₂eq/t magnesia terkalsinasi kaustik, 3,1 t CO₂eq/t magnesia bakar umum, 4,7 t CO₂eq/t magnesia bakar kelas menengah, 4,7 t CO₂eq/t magnesia leburan proses fase Tunggal, dan 7,8 t CO₂eq/t magnesia leburan proses dua fase.</p>
<p>Shridhar et al., 2013</p>	<p><i>Environmental Life Cycle Assessment of Traditional Bricks on Western Maharashtra, India</i></p>	<p>Life Cycle Assessment (LCA), menggunakan software SIMAPRO 7.3.3, Batasan sistem <i>cradle to gate</i>.</p>	<p>Emisi CO₂ merupakan presentase terbesar dari semua pelepasan ke atmosfer. Dalam hal ini efek dampak lingkungan, pengasaman memiliki nilai tertinggi. Hal ini terutama disebabkan oleh fakta bahwa pada tahap produksi, bahan bakar bermutu rendah dengan kandungan sulfur yang tinggi telah digunakan. Studi ini menunjukkan bahwa tungku pembakaran batu bata tradisional efisien dalam penggunaan batu bara di Maharashtra bagian barat.</p>
<p>l .,2020</p>	<p><i>Life cycle assessment of traditional and</i></p>	<p>Menggunakan tools LCA.</p>	<p>Dalam penelitian ini kategori dampak yang paling banyak muncul, yaitu : Perubahan iklim</p>



*alternative
bricks : A
review*

(CC), Toksisitas Manusia (HT) dan Ekotoksisitas Air Tawar (FE) dalam setiap kategori, produksi merupakan dampak tertinggi, proses produksi, proses pengeringan dan pembakaran memiliki potensi dampak tertinggi.

2.6 Kerangka Pemikiran Penelitian Analisis Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Refraktori Brick Converter di PT Vale Indonesia Tbk



Gambar 26 Kerangka pemikiran penelitian

